

引用格式: 何俊波, 吴艳宏. 利用土壤时间序列开展土壤磷的动态变化研究: 进展和展望[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 801-810.

HE Junbo, WU Yanhong. Overview of soil phosphorus dynamics using soil chronosequences: Progress and prospects [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 801-810.

## 利用土壤时间序列开展土壤磷的动态变化研究: 进展和展望

何俊波<sup>1,2</sup>, 吴艳宏<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 磷(P)是促进植物生长发育的重要元素,它显著影响着陆地生态系统的稳定。土壤P的动态变化主要受岩石风化与土壤发育过程的影响。利用土壤时间序列研究成土过程,并探讨这一过程中土壤P的动态变化,是近年来的研究热点。本文综述了这一方向的最新进展,总结了土壤时间序列的类型和利用土壤时间序列开展土壤P动态变化的相关研究,提出了研究展望:(1)在建立土壤时间序列时,应该更加关注土壤的发育程度,明确驱动土壤发育的主导因素,将驱动因素与土壤发育时间相结合,对土壤时间序列进行更加精细的划分;(2)利用土壤时间序列研究土壤P的动态变化时,需加深生物有效P的研究,并将生物有效P的动态变化与植被演替和微生物群落结构变化相结合;(3)研究土壤P的动态变化时,也需关注碳(C)、氮(N)等其他养分元素的迁移与转化,并探究成土过程中C、N等土壤元素对土壤P的影响。

**关键词:** 土壤时间序列;成土作用;生物地球化学循环;土壤磷;生物有效磷

**中图分类号:** P951

**文献标志码:** A

磷(P)是一种重要的养分元素,它影响着植物的生长和发育,并和碳(C)、氮(N)等元素维持着陆地生态系统的稳定<sup>[1-3]</sup>。通常,生态系统中总磷(Pt)的数量较大,但只有可溶的正磷酸根形态的P能够被生物直接利用,它们被称为生物有效P。利用树脂、弱酸性或弱碱性溶液,对土样进行浸提,可模拟植物根际行为,表征土壤P的生物有效性,定量分析土壤P的形态变化。树脂交换态P(Resin-P)是植物最容易获取的土壤P。利用2片HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的阴离子交换树脂膜(AEM)和20 mL的超纯水可以将Resin-P从土壤中提取出来;碳酸氢钠提取态P(NaHCO<sub>3</sub>-P)使用浓度为0.5 mol·L<sup>-1</sup>的

NaHCO<sub>3</sub>溶液进行浸提;氢氧化钠溶性P(NaOH-P)使用浓度为0.1 mol·L<sup>-1</sup>的NaOH溶液进行浸提;磷灰石型P(HCl-P)使用浓度为1 mol·L<sup>-1</sup>的HCl溶液进行浸提;残余态P(Residual-P)是极难被植物获取的土壤P,仅使用酸、碱溶液无法准确提取出土壤中的Residual-P。将NaHCO<sub>3</sub>-P和NaOH-P的提取液分成两份,一份直接测定磷酸根离子的浓度,得到的结果为碳酸氢钠提取态无机P(NaHCO<sub>3</sub>-Pi)和氢氧化钠溶性无机P(NaOH-Pi);另一份使用高压灭菌锅蒸煮后(121℃,2h)测定其磷酸根离子的浓度,将结果与NaHCO<sub>3</sub>-Pi和NaOH-Pi的浓度之差,分别为碳酸氢钠提取态有机P(NaHCO<sub>3</sub>-Po)和氢氧

收稿日期(Received date):2022-06-14;改回日期(Accepted date):2022-12-13

基金项目(Foundation item):四川省重点研发项目(2018JZ0075);中国科学院对外合作重点项目(131551KYSB20190028)。[Sichuan Province Key R&D Projects(2018JZ0075); Key Program of the Chinese Academy of Sciences for International Cooperation (131551KYSB20190028)]

作者简介(Biography):何俊波(1993-),男,四川南充人,博士研究生,主要研究方向:土壤养分元素的生物地球化学循环。[HE Junbo (1993-), male, born in Nanchong, Sichuan province, Ph.D. candidate, research on the biogeochemical cycling of soil nutrient elements]  
E-mail: hejunbo@imde.ac.cn

\*通讯作者(Corresponding author):吴艳宏(1969-),男,博士,研究员,主要研究方向:自然地理学。[WU Yanhong (1969-), male, Ph.D., professor, specialized in physical geography] E-mail: yhwu@imde.ac.cn

化钠溶性有机 P (NaOH-Po)<sup>[4-6]</sup>。为了进一步探究土壤 P 的形态变化对陆地生态系统的影响, HCl-P 被定义为原生矿物 P (P<sub>mineral</sub>), Residual-P 被定义为闭蓄态 P (P<sub>occluded</sub>), NaHCO<sub>3</sub>-Pi 和 NaOH-Pi 的总和被定义为非闭蓄态 P (P<sub>nonoccluded</sub>), NaHCO<sub>3</sub>-Po 和 NaOH-Po 的总和被定义为有机 P (Po)。Resin-P 和 P<sub>nonoccluded</sub> 可以被植物直接利用, 为生物有效 P<sup>[7-8]</sup>。

21 世纪以来, 碳排放急剧增加, 全球变暖持续加剧, 导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和 N 沉降增加, 陆地生态系统中 C 和 N 的生物可利用性不断增加<sup>[9]</sup>。但是, 全球气候变化对土壤 P 库的影响较小, P 的生物有效性成为土壤 C、N、P 的化学计量比失衡的关键因素<sup>[10]</sup>。因此, 关于土壤 P 库的动态变化及其影响因素的研究成为近年来的热点。近十年以来, 与土壤 P 和生物有效 P 相关的文献量都呈现出高速增长的趋势, 且与生物有效 P 相关的文献的增速更为明显, 所占比例由 2011 年的 16% 上升到 2021 年的 22% (图 1)。

土壤中的 P 主要来自于岩石的风化<sup>[11-12]</sup>, 并随着土壤年龄的增加而减少。因此, 土壤 P 的生物有效性取决于土壤发育程度, 并与其形态组成相关<sup>[13-14]</sup>。岩石风化过程与土壤发育过程是相当缓慢的物理、化学和生物过程的综合, 难以在实验室中

进行模拟<sup>[15]</sup>。土壤时间序列是在类似的植被、地形和气候条件下演化出来的具有遗传关系的土壤组合, 它将土壤之间的空间差异转化为时间差异<sup>[16-17]</sup>, 这种转化可以揭示土壤发育过程中土壤 P 库的变化规律<sup>[18-20]</sup>, 预测土壤未来的变化<sup>[21-25]</sup>, 为陆地生态系统的保护和恢复奠定科学基础。

## 1 土壤时间序列

### 1.1 土壤时间序列的类型

基于土壤发育周期的不同, VREEKEN<sup>[26]</sup> 将土壤时间序列分为以下四种类型: (1) 后切时间序列, 指土壤在过去的时间开始发育, 但终止时间相同 (图 2a); (2) 前切时间序列, 表示土壤在过去的同一时间开始发育, 但是, 终止时间不同 (图 2b); (3) 发育时间重叠序列, 指的是土壤在过去不同的时间开始发育, 终止的时间也不相同, 且在不同土壤发育的过程中存在历史的重叠 (图 2c); (4) 发育时间不重叠序列, 土壤在过去不同的时间开始发育, 终止时间也不相同, 但在不同土壤发育的过程中不存在历史的重叠 (图 2d)。其中, 后切时间序列 (图 2b) 是最常见的土壤时间序列类型。当土壤的演化过程尚不清楚时, 可利用叠加原理推断土壤的相对年龄。这种方法建立的土壤时间序列也被认为是有效的土壤时间序列。

### 1.2 土壤时间序列的构建

构建土壤序列的前提是明确土壤发育的时间, 仅依靠技术手段确定土壤发育的时间是十分困难的。因此, 构建土壤时间序列时, 大多在同一地质背景下, 选择已知年龄的土壤。例如: 冲积扇、河流阶地、地质滑坡、沿海沙丘、火山熔岩、冰碛等<sup>[27-28]</sup>。使用相同的采样方法采集表层土壤和母质层土壤, 并按时间顺序将表层土壤组成一个序列, 所选序列代表一个或几个土壤发育过程中的连续阶段。随后, 对比母质层土壤的各项指标, 判定所选土壤母质的均一性。只有在保证所观测土壤具有同种母质, 土壤 P 库的变化才能归因于土壤年龄和土壤发育过程<sup>[29]</sup>。该方法虽然可以根据已知的空间位置, 大致确定土壤的年龄。但是, 野外环境复杂, 依靠特殊地貌构建的土壤时间序列仍然存在一定的不确定性。为了使序列更加准确, 必须利用土壤本身的特征或者发育指标, 对土壤年龄进行验证。磁化率测

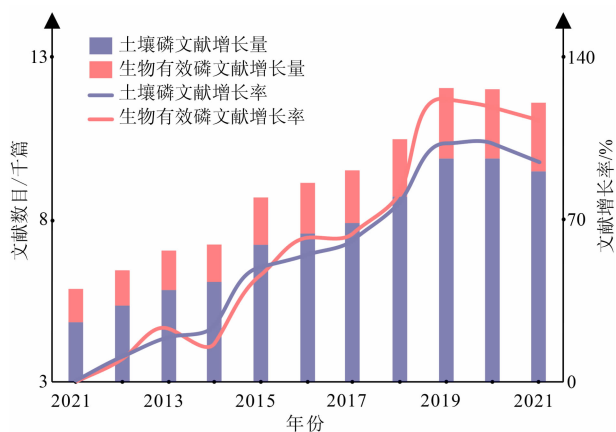


图 1 2011—2021 年土壤磷相关的文献统计

Fig. 1 Literature statistics related to soil phosphorus

from 2011 to 2021

(所用数据库为 ISI Web of Knowledge; 对于土壤 P, 检索主题为 soil phosphorus 或 soil phosphorus pool 或 soil phosphorus cycle; 对于生物有效 P, 检索主题为 bioavailable phosphorus 或 active phosphorus 或 effective phosphorus 或 available phosphorus。)

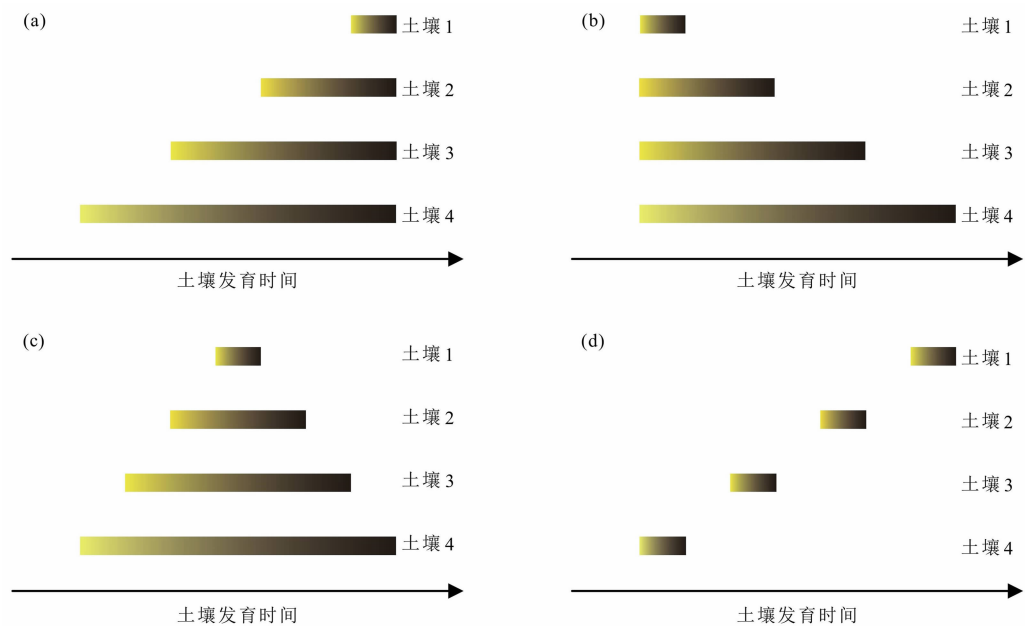


图2 土壤时间序列类型:(a)后切时间序列;(b)前切时间序列;(c)发育时间重叠序列;(d)发育时间不重叠序列<sup>[26]</sup>

Fig. 2 Types of soil chronosequences: (a) post-incision sequence; (b) pre-incision sequence; (c) time-transgressive sequence with historical overlap; (d) time-transgressive sequence without historical overlap<sup>[26]</sup>

量有助于评估土壤发生的均匀性,也可以用来计算土壤的年龄<sup>[30]</sup>。土壤活性铁(Feo)与游离铁(Fed)的比值随着土壤年龄的增加而减少。因此,Feo/Fed可以有效表征土壤发育时间<sup>[31]</sup>。土壤全铝(Alt)、游离铝(Ald)和全铁(Fet)的含量也与土壤发育时间相关, $[\text{Alt} \times \text{Fed}] / [\text{Ald} \times \text{Fet}]$ 在土壤演化初期迅速下降,在大约3 ka后达到渐近值<sup>[32]</sup>。因此,该比值也可以很好地指示土壤的年龄。HAUGLAND等<sup>[33-36]</sup>发现土壤发育早期,土壤指数随土壤年龄的增加而增加。因此,土壤指数也可以验证土壤发年龄。只有利用各种土壤发育指标不断验证土壤时间序列,才能保证序列中各阶段土壤年龄的正确性,建立科学有效的土壤时间序列。

## 2 利用土壤时间序列探究土壤P的动态变化

WALKER和SYERS<sup>[37]</sup>通过土壤时间序列,建立了土壤发育过程中P含量、形态组成和生物有效性变化的概念模型。该模型被广泛应用于土壤P的动态变化研究中,并在众多土壤时间序列上进行了验证。例如:夏威夷群岛沿线的玄武岩土壤时间序列<sup>[38]</sup>、亚利桑那北部的火山灰土壤时间序列<sup>[39]</sup>、

门多西诺台地的海洋沉积土壤时间序列<sup>[40]</sup>、新西兰的沿海沙丘土壤时间序列<sup>[41]</sup>、澳大利亚西部的沿海沙丘土壤时间序列<sup>[42]</sup>以及中国四川西部海螺沟冰川退缩区土壤时间序列<sup>[43]</sup>。

### 2.1 土壤P的含量变化

OLGA<sup>[44]</sup>利用26个不同时期的滑坡体,建立了时间跨度约为13 ka的土壤时间序列,发现表层土壤P含量在成土早期(100 a)显著增加,但随着土壤的持续发育,P含量开始缓慢下降,当土壤年龄超过1 ka后,所有P组分均下降到较低的水平。WU<sup>[43]</sup>研究发现,随着土壤的发育,表层土壤P含量迅速减少,发育80 a的表层土壤P的损失率为12.9%,发育120 a的表层土壤P的损失率达到了17.6%。土壤发育过程中,不同深度土壤P的变化也存在明显差异,随着土壤的发育,0~10 cm土层中的土壤P含量显著降低,30~40 cm土层中的土壤P含量则显著增加<sup>[44-46]</sup>。在土壤发育的不同阶段,土壤P的变化速率也存在差异,WU<sup>[43]</sup>通过海螺沟土壤时间序列,发现成土早期土壤P的流失速率较高。EGER<sup>[47]</sup>通过进一步的研究发现,土壤发育时间达到1 ka左右时,土壤处于典型的Al、Fe活动阶段,这一时期土壤P的损失最快;当土壤发育时间为3 ka时,土壤中所有P组分持续流失,但流失速率显

著降低;当土壤年龄超过 3 ka 时,土壤中所有 P 组分的损失速率将进一步降低,并逐渐趋于稳定;当土壤年龄超过 7 ka, *Poccluded* 将成为土壤中最主要的 P 形态,这一时期的生物有效 P 的含量极低。VITOUSEK<sup>[48]</sup> 利用夏威夷群岛,建立了时间跨度为 4 Ma 的土壤时间序列,发现陆地生态系统的初级生产力在成土早期(约 300 a)仅受 N 限制,成土中期(约 20 ka)土壤 P 对生态系统的限制逐渐增强,成土后期(约 4.1 Ma)生态系统的初级生产力仅受 P 限制,这说明随着土壤发育时间的增加,土壤中 P 的含量逐渐减少,而 N 的含量逐渐增多。一些土壤时间序列研究也表明,土壤 *Pt* 和可溶性 P 在土壤发育过程中减少,导致土壤发育后期 N:P 比率增加。例如:太平洋沿岸的一个阶地序列中,土壤中的可溶性 P 部分减少,闭塞的 P 增加,导致 N:P 在土壤发育的过程中快速增加<sup>[37]</sup>。这表明土壤 P 是该土壤时间序列后期的主要限制因素。综上所述,随着土壤发育,表层土壤 P 含量快速下降。在土壤发育后期,土壤 P 甚至成为了生态系统中的主要限制因素。

## 2.2 土壤 P 的形态变化

成土过程中,土壤 P 的形态组成也始终发生着变化。WALKER 和 SYERS<sup>[37]</sup> 的成土模型显示,在土壤发育初期土壤 *Pt* 的含量较高,且 *Pmineral* 是其主要成分。随着土壤的发育,*Pt* 和 P 的各个组分的含量迅速降低,但是 *Poccluded* 和 *Po* 在 *Pt* 中所占的比例却逐渐增加,在土壤发育后期 *Poccluded* 和 *Po* 成为 *Pt* 的主要成分(图 3a)。近年来,研究者在验证 WALKER 和 SYERS<sup>[37]</sup> 的成土模型时发现,在成土早期的 C 层土壤中,*Pmineral* 为土壤 P 的主体,所占比例达到了 *Pt* 的 90%,而生物有效 P 的含量较低。随着土壤的发育,A 层土壤中的 P 形态组成也

发生着显著变化,最明显的特征是 *Pmineral* 含量的持续减少和其他形态 P 含量的增加<sup>[13]</sup>。利用土壤时间序列还能探究垂向上土壤 P 形态的差异。研究表明,A 层土壤中 *Pmineral* 的含量随海拔的增高而增加,*Po* 则呈现与 *Pmineral* 相反的变化趋势。生物有效 P 的含量始终较低,次生矿物 P(Al、Fe 结合态 P)的含量也较低,*Poccluded* 的变化较小,始终是土壤 P 的最大组分。在高海拔地区 *Pmineral* 是 *Pt* 的第二大组分,而在低海拔地区,*Po* 则成为 *Pt* 的第二大组分<sup>[49]</sup>。这是由于有机物在土壤发育的过程中大量积累,导致土壤 *Po* 含量的增加。例如:俄罗斯西北部一个土壤时间序列,由于苏格兰松在该序列上广泛分布,导致土壤 *Po* 在土壤发育的过程中快速积累,即使该序列的时间跨度仅为 40 a<sup>[50]</sup>。还有研究表明,在潮湿的热带地区和新西兰西海岸的暖温带气候下,*Po* 也只需几百年就能积累起来。这是由于高降雨量和高温度有利于生物生长,导致 *Po* 在土壤发育的过程中快速积累<sup>[51]</sup>。

ANDRE<sup>[52]</sup> 将 WALKER 和 SYERS<sup>[37]</sup> 的成土模型应用于发生滑坡的地区,发现该模型不能解释滑坡地区土壤 P 形态的变化。ANDRE<sup>[52]</sup> 发现,发生滑坡后,土壤 *Pt*、*Po*、*Poccluded* 和 *Pnonoccluded* 的含量均快速增加(图 3b)。这是由于滑坡重置了土壤发育。滑坡之后的土壤重新回到了成土初期,导致了土壤中 P 的快速积累。为了进一步探讨土壤 P 的动态组成与土壤发育时间的关系,ZHOU<sup>[53]</sup> 利用土壤时间序列,量化了成土过程中土壤 P 的形态变化,成土初期,土壤 P 形态以 Ca 结合态 P 为主,表层 Al 结合态 P、Fe 结合态 P、*Po*、微生物量 P 和生物有效 P 较少;随着土壤的发育,表层土壤 *Po* 浓度逐渐升高,生物有效 P 含量也呈上升趋势;在土壤发

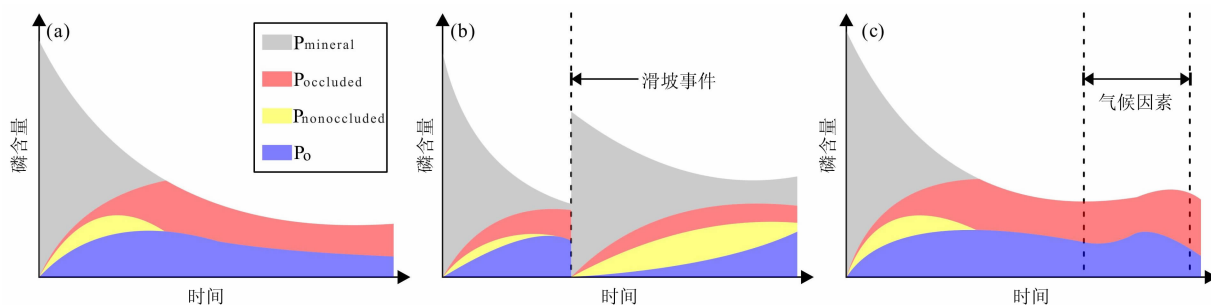


图 3 土壤磷形态和含量随时间的变化:(a) Walker 和 Syers 的模型<sup>[37]</sup>;(b) Andre 的模型<sup>[52]</sup>;(c) 受气候影响的土壤磷模型

Fig. 3 Changes in forms and amounts of soil P with time;

(a) model by Walker and Syers<sup>[37]</sup>; (b) model by Andre<sup>[52]</sup>; (c) model influenced by climate

育的后期,  $P_o$  是主要的 P 组分, 且大量的土壤 P 转化为生物量 P。为了探明成土过程中不同形态的 P 之间的相互转换, MARKUS<sup>[54]</sup> 在瑞士冰川退缩区, 建立了时间跨度为 150 a 的土壤时间序列, 并发现随着土壤的发育, 土壤中  $P_o$ 、生物有效 P 和  $P_{nonoccluded}$  的比例出现了明显变化, 在粗粒土壤中, 约 78% 的  $P_t$  转化为  $P_{nonoccluded}$ , 而在细粒土壤中, 约 81% 的  $P_t$  转化为  $P_{nonoccluded}$ 。

上述研究显示, 在土壤发育早期,  $P_{mineral}$  是土壤 P 的主要成分; 随着土壤的发育  $P_{mineral}$  快速分解, 导致  $P_{mineral}$  的含量急剧下降; 被分解的  $P_{mineral}$  部分被生物吸收, 部分形成  $P_{occluded}$ , 还有部分随着淋滤作用或地表径流流失, 这就是造成表层土壤  $P_t$  随土壤发育而减少的原因; 被生物吸收的 P, 最后又以  $P_o$  的形态返还到土壤中, 导致了土壤  $P_o$  的增加。

### 3 利用土壤时间序列探究成土因素对土壤 P 库的影响

成土因素也显著影响着土壤 P 的生物有效性。土壤时间序列忠实记录了土壤发育历史<sup>[55-56]</sup>, 可用于研究成土因素对土壤 P 生物有效性的影响, 获取成土过程与 P 释放速率之间的定量关系<sup>[10]</sup>。ZHOU<sup>[57]</sup> 利用土壤时间序列发现土壤发育的不同阶段, 岩石的风化速率存在明显差异, 随着土壤发育时间的增加, 矿物成分、粘土粒径、土壤有机质含量、pH、氧化还原电位(Eh)、植被演替以及微生物活动不断发生变化, 这些变化均会影响土壤 P 的生物有效性。土壤活性 Al、活性 Fe 和 Eh 通过相互作用共同影响 P 形态<sup>[10]</sup>, pH 对生物有效性 P 的影响表现为: pH 值为 0~6 时, 土壤 P 主要被氧化铁吸附; pH 值为 8~14 时, 土壤 P 主要被三水铝石吸附; pH 值为 6~8 时, 土壤 P 主要被粘土矿物吸附<sup>[58-60]</sup>。

气候因素是重要的成土因素之一。它对土壤的影响主要体现在两个方面: (1) 通过参与土壤母质的风化, 直接影响矿物质的分解与合成, 养分元素的积累与流失; (2) 通过影响植物的生长和微生物的活动, 间接参与养分元素的循环<sup>[61]</sup>。JENNIFER<sup>[62]</sup> 利用土壤时间序列对比了四个不同气候条件下土壤 P 库的变化, 结果表明不同气候条件会影响岩石的风化速率, 进而影响土壤 P 的生物有效性。

BOCKHEIM<sup>[63]</sup> 调查了 32 个土壤时间序列, 发现温度的增加速度与土壤中生物有效 P 的含量显著负相关。气候条件也可以通过影响土壤中 Fe、Al 的积累, 间接影响土壤 P 的生物有效性, 研究发现温度和含水量与土壤中 Fe、Al 的含量呈显著正相关关系, 而 Fe、Al 含量的增加将加快生物有效 P 的耗竭<sup>[64]</sup>。SUN<sup>[65]</sup> 以热带森林为研究对象, 通过 7 年的降雨控制实验, 研究了降水对土壤 P 生物有效性的影响。SUN<sup>[65]</sup> 通过研究发现, 降雨量的增加, 加强了土壤对 P 的最大吸附能力, 降低了碱性磷酸单酯酶(ALP) 的活性, 对土壤  $P_o$  的分解产生负面影响, 降水量的持续增加会加速土壤  $P_o$  的积累, 降低土壤 P 的生物有效性。为了进一步明确降水对生物有效 P 的影响, MILLER<sup>[66]</sup> 利用土壤时间序列研究了土壤生物有效 P 的变化机制, 研究发现, Eh 控制着土壤 P 的生物有效性, 随着降水的增多、Eh 的降低、还原作用的增强,  $P_{nonoccluded}$  逐渐减少, 而  $P_o$  逐渐增多, 土壤 P 的生物有效性降低。综合前人的研究表明, 气候因素会直接或者间接的影响土壤 P 的形态和含量, 使得土壤 P 库的变化在某一个成土阶段与 WALKER 和 SYERS<sup>[37]</sup> 的成土模型存在差异。但在长时间尺度下, 土壤 P 库的变化依然与该模型相契合(图 3c)。

生物因素也是重要的成土因素之一, 微生物群落结构变化与植被的持续演替, 均深刻影响着土壤的发育, 直接参与了陆地生态系统中 P 的循环, 显著影响着土壤 P 的生物有效性。利用土壤时间序列能够探究微生物对生物有效性 P 的影响。微生物主要通过微生物过程与土壤 P 循环的关系影响土壤 P 的生物有效性<sup>[12]</sup>。微生物过程主要包括: (1) 通过分泌荷尔蒙或酶(以磷酸酶为主)促进根系发育; (2) 通过分泌代谢产物(以有机酸和铁载体为主)和酶(以磷酸酶和纤维素酶为主), 改善根际土壤 P 的生物有效性。微生物量 P 库也是土壤 P 库的重要组成部分<sup>[67]</sup>。微生物可以通过矿化作用, 将  $P_o$  转化为生物有效 P, 但土壤  $P_o$  矿化的主要调控因素目前尚不清楚。微生物还能通过与植物的相互作用, 间接影响土壤 P 的循环。以丛枝菌根为例, 微生物可以改变土壤 P 与植物根毛之间的距离和接触面积, 从而影响植物对土壤 P 的吸收。微生物释放的有机酸和酶, 还可以影响土壤 P 的溶解度, 进而改变土壤 P 的浓度<sup>[68-70]</sup>。植物的演替显著

影响着生物有效 P 的变化,利用土壤时间序列可以发现:随着植被原生演替的进行,植物根系分泌物的释放与凋落物的分解使土壤 pH 不断降低,从而影响土壤 P 的形态转换<sup>[71-75]</sup>。植被的演替也影响着土壤磷酸酶活性,进而影响土壤 P 的生物有效性<sup>[76-77]</sup>。

工业革命之后,随着社会生产力的不断提高与人类生产活动的不断扩张,人类活动不可避免的影响着土壤 P 的生物有效性。土壤时间序列也可以作为研究人类活动对土壤养分元素影响的重要工具。通过连续观测受单一人类活动影响的土壤,可以建立完整的土壤时间序列,明确人为因素对土壤 P 生物有效性的影响。耕地是最常见的土地利用类型,研究发现,在持续的耕作过程中土壤 P 的流失速率不断增加,但 P 的生物有效性呈现出缓慢增加的趋势<sup>[78]</sup>。MA<sup>[79]</sup>采用<sup>14</sup>C/<sup>33</sup>P 同位素标记和宏基因组测序技术,进一步研究了耕作对土壤 P 生物有效性的影响,研究发现,高浓度农家肥(FYM)虽然提高了土壤 Po 的矿化率,增加了生物有效 P 的含量,但是降低了表层土壤对 P 的吸收潜力,加剧了土壤 P 的流失。放牧也是常见的土地利用类型之一,ZHANG 等<sup>[80-86]</sup>建立了时间跨度为 115 a 的土壤时间序列,以比较同一地区的原生土壤和放牧土壤的养分变化情况,受放牧影响的土壤与原生土壤相比,生物有效 P 含量和磷酸酶活性呈现出更大幅度的下降趋势。

利用土壤时间序列能够有效开展关于土壤 P 生物有效性影响因素的研究,明确成土因素对土壤生物有效 P 的影响,但关于成土因素对生物有效 P 的影响机制仍不清楚,需进一步研究。

## 4 展望

基于目前的研究现状,利用土壤时间序列开展土壤 P 的动态变化研究,仍需在以下方向继续探索:

(1)土壤时间序列构建方法。目前,关于土壤时间序列的类型已达成共识,但构建土壤时间序列的方法仍存在争议。关于土壤时间序列的构建,需明确驱动土壤发育的主导因素,将其与时间因素结合起来,建立生物-时间序列、气候-时间序列等组合土壤时间序列。地质背景显著影响着土壤的发育速率,因此,单纯的通过时间来划分土壤时间序列,难

以精确表征土壤的发育程度。前人在构建土壤时间序列时,较少考虑地质背景对土壤发育的影响,需明确地质背景与土壤发育的关系,对土壤时间序列进行更加精细的划分。

(2)土壤 P 生物有效性的影响机制。前人利用土壤时间序列开展了大量土壤 P 循环的研究,关于土壤 P 库的动态变化也已达成了一定的共识,但成土因素对土壤 P 生物有效性的影响机制仍不明确。成土因素对土壤 P 库的影响是动态的。土壤发育初期,母质因素和地形因素是否主导着土壤 P 库的变化,影响着土壤 P 的生物有效性?随着土壤的发育,气候因素对土壤 P 库的影响是否逐渐增强?土壤发育到了什么阶段,气候因素才能成为主导因素?这些问题都需要利用土壤序列进行更加深入的研究。另一方面,土壤的发育伴随着生态系统的演变、植被的演替和微生物群落结构的变化,这些生物过程往往与 P 的生物有效性形成互馈,需进一步探讨植被发育与生物有效 P 的关系,为生态系统的保护与恢复提供理论支撑。与土壤 P 类似,土壤 C、N 等养分元素也随着土壤发育而变化,并且与 P 的生物地球化学过程相互影响。对生态系统而言,需遵循 C、N、P 的生物计量化学原则,即在生态系统中维持一定的 C、N、P 生物计量化学平衡关系。未来应加强 C、N、P 生物地球化学循环的耦合关系研究,充分利用土壤时间序列,探讨养分元素间相互作用机制。

## 参考文献(References)

- [1] SHINA C L K, PANKAZ K S, RAM B P, et al. Why nature really chose phosphate [J]. *Science*, 1987, **235** (4793): 1173 - 1178. DOI: 10.1126/science.2434996
- [2] WATANABE M D B, ORTEGA E. Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: Valuation of water, carbon and nitrogen processes [J]. *Environmental Science and Policy*, 2011, **14** (6): 594 - 604. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.05.013
- [3] NAJAM A, RAHMAN A A, HUQ S, et al. Integrating sustainable development into the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. *Climate Policy*, 2003, **3** (1): S9 - S17. DOI: 10.1016/j.clipol.2003.10.003
- [4] Hedley M J, Stewart J W B. Method to measure microbial phosphate in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, **14** (4): 377 - 385. DOI: 10.1016/0038-0717(82)90009-8
- [5] JOHNSON A H, FRIZANO J, VANN D R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure [J]. *Oecologia*, 2003, **135** (4): 487 - 499. DOI: 10.1007/s00442-002-1164-5
- [6] 吴艳宏, PRIETZEL J, 周俊, 等. 两种形态分析方法对冰川退

- 缩时间序列土壤中磷的生物有效性评价[J]. 中国科学. 地球科学, 2014, **57**(15): 1860–1868. [WU Yanhong, PRIETZEL J, ZHOU Jun, et al. Soil phosphorus bioavailability assessed by XANES and Hedley sequential fractionation technique in a glacier foreland chronosequence in Gongga Mountain, southwestern China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(15): 1860–1868] DOI: 10.1007/s11430-013-4741-z
- [7] ACHAT D L, BAKKER M R, MOREL C. Process-based assessment of phosphorus availability in a low phosphorus sorbing forest soil using isotopic dilution methods [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(6): 2131–2142. DOI: 10.2136/sssaj2009.0009
- [8] PRIETZEL J, KLYSUBUN W. Phosphorus K-edge XANES spectroscopy has probably often underestimated iron oxyhydroxide-bound P in soils [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, **25**(6): 1736–1744. DOI: 10.1107/S1600577518013334
- [9] 王吉鹏, 吴艳宏. 磷的生物有效性对山地生态系统的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1204–1214. [WANG Jipeng, WU Yanhong. Phosphorus bioavailability in mountain ecosystems: Characteristics and ecological roles [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(5): 1204–1214] DOI: 10.5846/stxb201407111421
- [10] WU Yanhong, ZHOU Jun, YU Dong, et al. Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems [J]. Journal of Mountain Science, 2013, **10**(1): 43–53. DOI: 10.1007/s11629-013-2386-1
- [11] FILIPPELLI G M. The global phosphorus cycle: Past, present and future [J]. Elements, 2008, **4**(2): 89–95. DOI: 10.2113/GSELEMENTS.4.2.89
- [12] 周俊. 海螺沟冰川退缩迹地风化——成土过程与土壤磷形态研究[D]. 成都: 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 2014: 3–11. [ZHOU Jun. Weathering, pedogenesis and changes of soil phosphorus speciation of Hailuoguo Glacier foreland chronosequence [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2014: 3–11]
- [13] SMAL H, LIGEZA S, PRANAGAL J, et al. Changes in the stocks of soil organic carbon, total nitrogen and phosphorus following afforestation of post-arable soils: A chronosequence study [J]. Forest Ecology and Management. 2019, **451**: 117536. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117536
- [14] FEITOSA M M, SILVA Y J A B, BIONDI C M, et al. Rare Earth elements in rocks and soil profiles of a tropical volcanic archipelago in the Southern Atlantic [J]. Catena, 2020, **194**: 104674. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104674
- [15] 朱大运, 王健力. 青藏高原冰芯重建古气候研究进展分析[J]. 地理科学进展, 2013, **32**(10): 1535–1544. [ZHU Dayun, WANG Jianli. Progress in palaeoclimate research on the Tibet Plateau based on ice core records [J]. Progress in Geography, 2013, **32**(10): 1535–1544] DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.10.011
- [16] IVANOVA E A, PERSHINA E V, SHAPKIN V M, et al. Shifting prokaryotic communities along a soil formation chronosequence and across soil horizons in a South Taiga ecosystem [J]. Pedobiologia Journal of Soil Ecology, 2020, **81–82**: 150650. DOI: 10.1016/j.pedobi.2020.150650
- [17] HARDEN J W. A quantitative index of soil development from field descriptions: Examples from a chronosequence in central California [J]. Geoderma, 1982, **28**: 1–28. DOI: 10.1016/0016-7061(82)90037-4
- [18] VINCENT K R, BULL W B, CHADWICK O A. Construction of a soil chronosequence using the thickness of pedogenic carbonate coatings [J]. Journal of Geological Education, 1994, **42**(4): 316–324. DOI: 10.5408/0022-1368-42.4.316
- [19] MOHAMMED A K, HIRNAS D R, NEMES A, et al. Exogenous and endogenous controls on the development of soil structure [J]. Geoderma, 2020, **357**: 113945. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113945
- [20] SCHINDLER M, MICHEL S, BATCHELDOR D, et al. A nanoscale study of the formation of Fe-(hydr)oxides in a volcanic regolith: Implications for the understanding of soil forming processes on Earth and Mars [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019, **264**: 43–66. DOI: 10.1016/j.gca.2019.08.008
- [21] BOCKHEIM J G. Solution and use of chronofunctions in studying soil development [J]. Geoderma, 1980, **24**: 71–85. DOI: 10.1016/0016-7061(80)90035-X
- [22] CHODAK M, PIETRZYKOWSKI M, NIKLINSKA M. Development of microbial properties in a chronosequence of sandy mine soils [J]. Applied Soil Ecology, 2009, **41**(3): 259–268. DOI: 10.1016/j.apsoil.2008.11.009
- [23] EVANS D L, QUINTON J N, TYE A M, et al. How the composition of sandstone matrices affects rates of soil formation [J]. Geoderma, 2021, **401**: 115337. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115337
- [24] BEILKE A J, BOCKHEIM J G. Carbon and nitrogen trends in soil chronosequences of the Transantarctic Mountains [J]. Geoderma, 2013, **197–198**: 117–125. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.01.004
- [25] JENNY H, ARKLEY R J, SCHULTZ A M. The pygmy forest-podsol ecosystem and its dune associates of the Mendocino Coast [J]. Madrono 1969, **20**: 60–74.
- [26] VREEKEN W J. Principal kinds of chronosequences and their significance in soil history [J]. Soil Science, 1975, **26**(4): 378–394. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1975.tb01962.x
- [27] SAMOUELIAN A and CORNU S. Modelling the formation and evolution of soils, towards an initial synthesis [J]. Geoderma, 2008, **145**(3–4): 401–409. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.01.016
- [28] SCHAEZTL R J, BARRETT L R, WINKLER J A. Choosing models for soil chronofunctions and fitting them to data [J]. European Journal of Soil Science, 1994, **45**: 219–232. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1994.tb00503.x
- [29] YEMEFACK M, ROSSITER D G, JETTEN V G. Empirical modelling of soil dynamics along a chronosequence of shifting

- cultivation systems in southern Cameroon [J]. *Geoderma*, 2006, **133**(3–4): 380–397. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.08.003
- [30] EPPES M C, BIERMA R, VINSON D, et al. A soil chronosequence study of the Reno valley, Italy: Insights into the relative role of climate versus anthropogenic forcing on hillslope processes during the mid-Holocene [J]. *Geoderma*, 2008, **147**(3–4): 97–107. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.07.011
- [31] EGLI M, FITZE P, MIRABELLA A. Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits: Results from chronosequences of Swiss alpine environments [J]. *Catena*, 2001, **45**: 19–47. DOI: 10.1016/S0341–8162(01)00138–2
- [32] BIRKELAND P W. Soil-geomorphic research-a selective overview [J]. *Geomorphology*, 1990, **3**: 207–224. DOI: 10.1016/0169–555X(90)90004–A
- [33] HAUGLAND J E, HAUGLAND B S O. Cryogenic disturbance and pedogenic lag effects as determined by the profile developmental index: The styggeðalsbreen glacier chronosequence, Norway [J]. *Geomorphology*, 2008, **96**(1–2): 212–220.
- [34] SCARICGLIA F, PELLE T, PULIVE I, et al. A comparison of Quaternary soil chronosequences from the Ionian and Tyrrhenian coasts of Calabria, southern Italy: Rates of soil development and geomorphic dynamics [J]. *Quaternary International*, 2015, **376**: 146–162. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.01.009
- [35] HUGGETT R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: A critical review [J]. *Catena*, 1998, **32**: 155–172. DOI: 10.1016/S0341–8162(98)00053–8
- [36] CORNU S, MONTAGNE D, VASCONCELOS P M. Dating constituent formation in soils to determine rates of soil processes: A review [J]. *Geoderma*, 2009, **153**(3–4): 293–303. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.08.006
- [37] WALKER T W, SYERS J K. The fate of phosphorus during pedogenesis [J]. *Geoderma*, 1976, **15**: 1–19. DOI: 10.1016/0016–7061(76)90066–5
- [38] CREWS T E, KITAYAMA K, FOWNES J H, et al. Changes in soil phosphorus fractions and ecosystem dynamics across a long chronosequence in Hawaii [J]. *Ecology*, 1995, **76**(5): 1407–1424. DOI: 10.2307/1938144
- [39] SELMANTS P C, HART S C. Phosphorus and soil development: Does the walker and syers model apply to semiarid ecosystems? [J]. *Ecology*, 2010, **91**(2): 474–484. DOI: 10.1890/09–0243.1
- [40] IZQUIERDO J E, HOULTON B Z, VAN HUYSEN T L. Evidence for progressive phosphorus limitation over long-term ecosystem development: Examination of a biogeochemical paradigm [J]. *Plant Soil*, 2013, **367**: 135–147. DOI: 10.1007/s11104–013–1683–3
- [41] TURNER B L, CONDRON L M, WELLS A, et al. Soil nutrient dynamics during podzol development under lowland temperate rain forest in New Zealand [J]. *Catena*, 2012, **97**: 50–62. DOI: 10.1016/j.catena.2012.05.007
- [42] TURNER B L, LALIBERT? E. Soil development and nutrient availability along a 2 million-year coastal dune chronosequence under species-rich mediterranean shrubland in Southwestern Australia [J]. *Ecosystems*, 2015, **18**(2): 287–309. DOI: 10.1007/s10021–014–9830–0
- [43] WU Yanhong, ZHOU Jun, BING Haijian, et al. Rapid loss of phosphorus during early pedogenesis along a glacier retreat chronosequence, Gongga Mountain (SW China) [J]. *PeerJ*, 2015, **3**: e1377. DOI: 10.7717/peerj.1377
- [44] VINDUŠKOVÁ O, PÁNEK T, FROUZ J. Soil C, N and P dynamics along a 13 ka chronosequence of landslides under semi-natural temperate forest [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, **213**: 18–29. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.04.001
- [45] XIAO Rong, BAI Junhong, ZHANG Honggang, et al. Changes of P, Ca, Al and Fe contents in fringe marshes along a pedogenic chronosequence in the Pearl River estuary, South China [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, **31**(6): 739–747. DOI: 10.1016/j.csr.2011.01.013
- [46] 何清清, 邴海健, 吴艳宏, 等. 海螺沟冰川退缩区土壤元素分布特征及影响因素[J]. *山地学报*, 2017, **35**(5): 698–708. [HE Qingqing, BING Haijian, WU Yanhong, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil elements in the retreated area of Hailuoguo Glacier, SW China [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(5): 698–708] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000269
- [47] EGER A, ALMOND P C, CONDRON L M. Pedogenesis, soil mass balance, phosphorus dynamics and vegetation communities across a Holocene soil chronosequence in a super-humid climate, South Westland, New Zealand [J]. *Geoderma*, 2011, **163**(3–4): 185–196. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.04.007
- [48] VITOUSEK P M, FARRINGTON H. Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory [J]. *Biogeochemistry*, 1997, **37**(1): 63–75. DOI: 10.1023/A:1005757218475
- [49] MAVRIS C, EGLI M, PLOTZE M, et al. Initial stages of weathering and soil formation in the Morteratsch proglacial area (Upper Engadine, Switzerland) [J]. *Geoderma*, 2010, **155**: 359–371. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.12.019
- [50] CELI L, CERLI C, TURNER B L, et al. Biogeochemical cycling of soil phosphorus during natural revegetation of *Pinus sylvestris* on disused sand quarries in Northwestern Russia [J]. *Plant Soil*, 2013, **367**: 121–134. DOI: 10.1007/s11104–013–1627–y
- [51] SCHLESINGER W H, BRUIJNZEEL L A, BUSH M B, et al. The biogeochemistry of phosphorus after the first century of soil development on Rakata Island, Krakatau, Indonesia [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **40**(1): 37–55. DOI: 10.1023/A:1005838929706
- [52] EGER A, YOO K, ALMOND P C, et al. Does soil erosion rejuvenate the soil phosphorus inventory? [J]. *Geoderma*, 2018, **332**: 45–59. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.06.021
- [53] ZHOU Jun, WU Yanhong, JORG P, et al. Changes of soil

- phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China) [J]. *Geoderma*, 2013, **195** – **196**: 251 – 259. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.12.010
- [54] EGLI M, FILIP D, MAVRIS C, et al. Rapid transformation of inorganic to organic and plant-available phosphorus in soils of a glacier forefield [J]. *Geoderma*, 2012, **189** – **190**: 215 – 226. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.06.033
- [55] CHEN C R, HOU E Q, CONDRON L M, et al. Soil phosphorus fractionation and nutrient dynamics along the Cooloola coastal dune chronosequence, southern Queensland, Australia [J]. *Geoderma*, 2015, **10**: 11986. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.04.027
- [56] GARDNER L R. The role of rock weathering in the phosphorus budget of terrestrial watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 1990, **11** (2): 97 – 110. DOI: 10.1007/bf00002061
- [57] ZHOU Jun, BING Haijian, WU Yanhong, et al. Weathering of primary mineral phosphate in the early stages of ecosystem development in the Hailuoguo Glacier foreland chronosequence [J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**: 450 – 461. DOI: 10.1111/ejss.12536
- [58] OHNO T, AMIRBAHMAN A. Phosphorus availability in boreal forest soils: A geochemical and nutrient uptake modeling approach [J]. *Geoderma*, 2010, **155**(1–2): 46 – 54. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.11.022
- [59] ROBERTS K, DEFFOREY D, TURNER B L, et al. Oxygen isotopes of phosphate and soil phosphorus cycling across a 6500 year chronosequence under lowland temperate rainforest [J]. *Geoderma*, 2015, **257** – **258**: 14 – 21. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.04.010
- [60] KANA J, KOPACEK J, CAMARERO L, et al. Phosphate sorption characteristics of European Alpine soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2011, **75**(3): 862 – 870. DOI: 10.2136/sssaj2010.0259
- [61] 隋玉柱. 从彭阳剖面看黄土成壤模式及气候变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2007. [SUI Yuzhu. The soil-forming mode and paleoclimatic changes of Pengyang loess section [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007] DOI: 10.1016/j.quaint.2021.08.003
- [62] HARDEN J W, TAYLOR E M. A quantitative comparison of soil development in four climatic regimes [J]. *Quaternary Research*, 1983, **20**: 342 – 359. DOI: 10.1016/0033-5894(83)90017-0
- [63] BOCKHEIM J G. Soil development rates in the Transantarctic Mountains [J]. *Geoderma*, 1990, **47**: 59 – 77. DOI: 10.1016/0016-7061(90)90047-D
- [64] KHOKHLOVA O S, KHOKHLOV A A, OLEJNIK S A, et al. Paleosols from the groups of burial mounds provide paleoclimatic records of centennial to intercentennial time scale: A case study from the Early Alan cemeteries in the Northern Caucasus (Russia) [J]. *Catena*, 2007, **71**: 477 – 486. DOI: 10.1016/j.catena.2007.03.013
- [65] SUN Feng, SONG Chengjun, WANG Mei, et al. Long-term increase in rainfall decreases soil organic phosphorus decomposition in tropical forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **151**: 107959. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.108056
- [66] MILLER A J, SCHUUR E A G, CHADWICK O A. Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils [J]. *Geoderma*, 2001, **102**(3–4): 219 – 237. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00016-7
- [67] TATE K R. The Biological Transformation of P in Soil [J]. *Plant and Soil*, 1984, **76**: 245 – 256. DOI: 10.1007/BF02205584
- [68] BOLAN N S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants [J]. *Plant Soil*, 1991, **134** (2): 189 – 207. DOI: 10.1007/BF00012037
- [69] RICHARDSON A E, LYNCH J P, RYAN P R, et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture [J]. *Plant Soil*, 2011, **349**(1–2): 121 – 156. DOI: 10.1007/s11104-011-0950-4
- [70] PRIETZEL J, DUMIG A, WU Yanhong, et al. Synchrotron-based P K-edge XANES spectroscopy reveals rapid changes of phosphorus speciation in the topsoil of two glacier foreland chronosequences [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **108**: 154 – 171. DOI: 10.1016/j.gca.2013.01.029
- [71] DEVAU N, LE CADRE E, HINSINGER P, et al. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus; Experimental and mechanistic modelling approaches [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, **24**(11): 2163 – 2174. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.09.020
- [72] RICHARDSON A E, SIMPSON R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability [J]. *Plant Physiology*, 2011, **156**(3): 989 – 996. DOI: 10.1104/pp.111.175448
- [73] IPPOLITO J A, BLECKER S W, Freeman C L, et al. Phosphorus biogeochemistry across a precipitation gradient in grasslands of central North America [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, **74**(8): 954 – 961. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2010.01.003
- [74] JOBBAGY E G, JACKSON R B. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **53**(1): 51 – 77. DOI: 10.1023/A:1010760720215
- [75] PORDER S, CHADWICK O A. Climate and soil-age constraints on nutrient uplift and retention by plants [J]. *Ecology*, 2009, **90** (3): 623 – 636. DOI: 10.1890/07-1739.1
- [76] 舒世燕, 王克林, 张伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被不同演替阶段土壤磷酸酶活性[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(9): 1722 – 1728. [SHU Shiyan, WANG Kelin, ZHANG Wei, et al. Soil alkaline phosphatase activity at different vegetation succession stages in karst peak-cluster depression [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(9): 1722 – 1728] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2010.0313
- [77] 胡忠良. 贵州中部喀斯特山区不同植被下土壤养分与微生物功能变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 11 – 16. [HU Zhongliang. The change of soil nutrients and microbial functions under different vegetation in karst mountains area, central

- Guizhou province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009: 11 – 16] DOI: 10.1016/j.agee.2016.02.020
- [78] HEDDE M, AUBERT M, DECA? NS T, et al. Dynamics of soil carbon in a beechwood chronosequence forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(1): 193 – 202. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.09.004
- [79] MA Qingxu, WEN Yuan, MA Jinzhao, et al. Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus cycling: A combined metagenomic and <sup>33</sup>P/<sup>14</sup>C labelling study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 149: 107959. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.107959
- [80] ZHANG Yaqi, FINN D, BHATTACHARYA R, et al. Long-term changes in land use influence phosphorus concentrations, speciation, and cycling within subtropical soils [J]. *Geoderma*, 2021, **393**: 115010. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115010
- [81] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecological Applications*, 2010, **20**(1): 5 – 15. DOI: 10.1890/08-0127.1
- [82] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, **123**: 1 – 22. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- [83] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D, et al. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, **305**(5683): 509 – 513. DOI: 10.1126/science.1109723
- [84] LUGO A E, BROWN S. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon [J]. *Plant Soil*, 1993, **149**: 27 – 41. DOI: 10.1007/BF00010760
- [85] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**: 317 – 327. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x
- [86] POEPLAU C, DON A, VESTERDAL L, et al. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 2415 – 2427. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x

## Overview of Soil Phosphorus Dynamics Using Soil Chronosequences: Progress and Prospects

HE Junbo<sup>1,2</sup>, WU Yanhong<sup>1\*</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610299, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Phosphorus (P) is an essential nutrient for plant growth, and dominates the stability of terrestrial ecosystems. Changes in P content in soils are primarily governed by rock weathering and pedogenesis. Investigations into the process of soil formation using chronosequences and its dynamics has been an research highlight in soil science for recent years. In this study, it tried to sketch out the research achievements on soil P dynamics; it addressed the types of chronosequences and the updates relative to soil P dynamics using chronosequences. According to the overview of soil phosphorus dynamics, the following research prospect and emphasis are concluded. (1) In the case of constructing a chronosequence, more attentions should focus attention on the phase of soil development, as well as on the dominant factors which drive soil evolution. A integrated research on the drivers along with soil development time should be made to properly chronicle the chronosequences. (2) As applying chronosequences to study the changes in soil P, the changes in bioavailable P should be traced by with inclusion of the succession of vegetation and the structural adaption in microbial community. (3) It is also necessary to investigate the migration and transformation of other nutrient elements, such as carbon (C) and nitrogen (N), for their effects on soil P during pedogenesis.

**Key words:** chronosequences; pedogenesis; biogeochemical cycle; soil phosphorus; bioavailable phosphorus