

文章编号: 1008-2786-(2016)3-374-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000141

梯田生态系统服务与管理研究进展

陈蝶^{1,2} 卫伟^{1*} 陈利顶¹ 于洋¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 梯田是山地丘陵区广泛分布的一种古老的农业生态系统。科学设计、合理修建与管理的梯田通过改变地形、减缓坡度, 从而减少产流产沙量, 在全球各地不同环境条件下得到广泛应用。梯田具有水土保持、生态恢复和农业增产的多重效益, 在治理水土流失的同时, 也降低了洪水、干旱、滑坡等自然灾害的发生风险, 减少了土壤养分流失, 是提高陆地生态系统碳汇功能的重要途径之一。此外, 梯田改变作物的生长条件, 达到水热资源高效利用的目的, 进而使作物提高应对极端气候的能力, 增加作物产量, 提高土地承载力。梯田通过增加景观异质性, 为生物提供生境和廊道, 有利于生物多样性保护。一些地区的梯田作为重要的文化遗产和旅游胜地得到保存, 然而当梯田遭到荒废后, 由于侵蚀、坍塌等因素会导致严重的土地退化。在当前全球气候变化和社会经济发展的大背景下, 将梯田生态系统服务认知转变为有效保护和管理生态系统的行动, 对于促进梯田生态系统的可持续发展、增进人类福祉具有重要意义。通过总结梯田生态系统服务与管理的研究进展, 探讨了建立人地关系和谐的梯田生态系统亟需解决的若干问题, 包括梯田生态系统管理的量化目标和任务、流域尺度梯田对水文地貌动态以及植被恢复的影响等。

关键词: 梯田; 生态系统服务; 生态系统管理; 水土保持; 生态恢复

中图分类号: S157.3

文献标志码: A

梯田是在丘陵山坡地上沿等高线方向修筑的条状台阶式或波浪式断面的田地, 由不同大小和形状的平面结构组成, 田面可用于耕作, 边缘用土或石块砌成梯级状田埂, 以防治水土流失^[1]。经过科学设计、合理修建和有效管理的梯田能够减缓坡度、改变径流路径, 从而实现削减径流冲刷力、促进降水就地入渗和减流减沙之目的^[2-5]。梯田具有保持水土、提高地力、从时空上合理调控雨水资源的独特功能, 因而可以减轻极端降雨事件导致的侵蚀风险^[1,6]。

坡面治理在控制水土流失的同时, 还可以改善生产用水的水土条件, 促进农林牧业发展, 并可为沟道治理和退化生态系统恢复奠定基础^[7-10]。梯田的通风透光条件较好, 能有效改善土壤理化性质, 有利于作物生长和营养物质的积累^[3,11], 并提高农业生产力和经济效益^[12]。农耕措施(如灌溉和耕作)也能提高土壤剖面的有机质和养分^[13], 这也是梯田始终被作为有效的水土保持措施之一的原因。

中国是世界上梯田分布最广的国家之一, 按其

收稿日期(Received date): 2015-10-06; 改回日期(Accepted): 2015-11-20。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41371123, 41390462); 城市与区域生态国家重点实验室资助项目(SKLURE2013-1-02)。[The Project for National Natural Science Foundation of China, No. 41371123, 41390462; The Innovation Project of the State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology of China (SKLURE2013-1-02).]

作者简介(Biography): 陈蝶(1990-), 女, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与景观生态研究。[Chen Die(1990-), female, born in Tianmen, Hubei Province, master candidate, engaged in research on soil and water conservation and landscape ecology.]E-mail: chymchendie@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 卫伟(1978-), 男, 河南封丘人, 博士, 副研究员, 主要从事景观生态与生态水文研究。[Wei Wei(1978-), male, born in Fengqiu, Henan Province, Ph.D. associate researcher, engaged in research of landscape ecology and eco-hydrology.]E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

形成时间大致分为两类:一类是人类在长期适应自然的过程中对山地改造而修建的梯田,主要分布在南方山地丘陵区,以水稻种植为主;另一类是在新的经济建设时期,靠人力和机械在气候较干旱、水土流失严重地区修建的梯田,主要集中在黄河中上游的黄土高原地区,多为旱作梯田。梯田作为一种特殊生态系统类型,除在中国有大规模的建设外,世界许多国家和地区均有分布,如地中海沿岸的西班牙、法国、意大利、希腊、突尼斯、阿尔及利亚,南非的埃塞俄比亚、肯尼亚、坦桑尼亚、乌干达、卢旺达,美洲的墨西哥、巴西、秘鲁,东南亚的菲律宾、印度尼西亚、泰国、越南、印度、斯里兰卡,以及韩国、日本等。其中著名的有中国的哈尼梯田、龙脊梯田、紫鹊界梯田,菲律宾的巴纳韦水稻田和秘鲁的马丘皮克丘梯田等。

理想的梯田应该在自然和人为耦合作用下达到水力平衡状态。由于坡耕地坡面不稳定,加之降水和径流冲刷,土壤结构遭到破坏,导致表土和土壤养分严重流失,土地生产力下降^[14-15]。20世纪70年代以来,随着全球人口数量剧增,城市化和工业化进程加快,耕地面积逐渐减少、土地资源利用不合理等问题日益突出,人地之间矛盾加剧,最终导致了耕地保护和社会需求的不平衡。此外由于梯田耕作与维护的困难,许多地区的梯田遭到荒废,城市扩张和环境污染等问题,已严重威胁到世界许多地方的梯田生态系统,使之面临退化和消失^[6,16]。坡面既是山区、丘陵区农林牧业生产集中之地,也是沟道泥沙和径流的策源地,因此加强该类立地条件下的生态系统服务研究,进而实现梯田的科学管理,对于促进相关地区的生境保护和人地关系和谐具有重要意义。

1 梯田的生态系统服务

梯田改变了陆地景观,从而直接影响当地的水文和径流特征,同时改变土壤理化性质,增加区域的景观异质性,为生物多样性提供生境和廊道,对维持坡地景观格局、生态功能和过程具有重要意义^[17-18]。合理修建和科学管理的梯田能显著提高土地生产力和经济效益^[3,7,10,12,19]。梯田为人类提供多重生态系统服务,主要包括:涵养水源、保持水土、改善立地环境、提供净初级生产力、碳蓄积和碳汇、调节气候、改良土壤、提供生境、保护生物多样性以及宗教、美学等精神文化价值(图1)。尽管直接

进行梯田生态系统服务评价的研究不多,但国内外众多学者在不同的生态系统类型区从不同角度对梯田的生态系统服务进行了研究和评价。

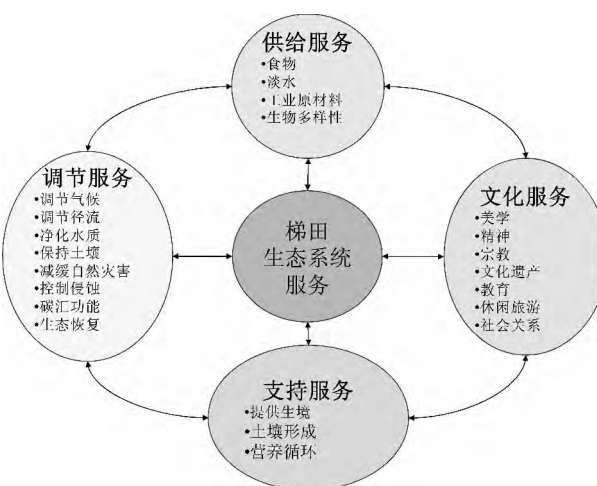


图1 梯田生态系统服务示意图

Fig. 1 Diagram of ecosystem services provided by terraces

1.1 水文调节

1.1.1 调控径流

坡面径流的科学调控与合理利用是小流域综合治理的核心问题,径流速度及其动力大小,与降水特征、地形坡度、土壤性质、植被覆盖、岩石软硬等因素密切相关。Meerkerk等^[16]基于水文连通性理论研究了地中海地区半干旱流域的梯田降雨-径流模型模拟方法,认为梯田能显著降低流域内水文连通性,进而改变流域的汇水面积和洪峰流量。Lesschen等^[20]在西班牙东南部 Carcavo 流域利用 LAPSUS 模型发现,梯田的存在能有效阻止径流和泥沙进入沟渠,流域尺度的水文连通性主要取决于植被和梯田的空间分布。Abu Hammad等^[3]在巴勒斯坦的研究发现,修建石坎梯田后径流系数从20%下降到4%。Gardner和Gerrard^[21]在尼泊尔中部丘陵区研究发现,旱作梯田的径流系数为5%~50%,并认为其主要取决于土壤的质地、容重和入渗性,此外增加地表覆盖也能有效减少径流。在西班牙庇里牛斯山,梯田在夏季可以入渗约50mm降雨,持续24h以上不产生径流;但梯田内土层较浅,土壤含水量较高,雨季易达到饱和,进而导致迅速产流,水渠灌溉也可能加快这一水文过程^[22]。降雨径流调控是解决干旱缺水 and 水土流失的重要方式,康玲玲等^[23]通过分析黄土高原不同分区梯田对径流的影响,同样认为降

雨量、降雨强度及梯田质量是梯田生态系统发挥径流调控功能的重要因素,同时提出梯田所处地域的地形和产汇流条件也是影响径流形成的关键因素。

1.1.2 涵养水源

梯田通过截断坡面径流,减小水文连通性,促进降水下渗,提高土壤含水量,同步解决土壤水分亏缺与水土流失的问题。降水、径流、入渗、蒸发等水文过程,以及地貌、土壤性质、土地利用方式、梯田结构、植被覆盖、修建年限等均对土壤含水量有不同程度影响。Chow 等^[24]发现在梯田修建排水沟渠可以有效减少侵蚀,增加水分入渗,提高表层土壤的储水量,保证作物生长的水分供应。由于水平平台整地后,一定程度上降低了土壤的毛管孔隙度,土壤持水能力降低,在受气象因素影响较大的表层土壤,可能会出现梯田水平平台比台间坡面土壤含水率低的现象,此外由于偏粘性土壤具有丰富的毛管孔隙,其改造为水平平台后改善土壤水分的效果比偏沙性土壤好^[25]。作物对梯田土壤水分的吸收利用,以及蒸散发等因素,也可能减少梯田土壤储水量。张玉斌等^[26]发现水平梯田除表层的土壤含水不能够满足作物有效用水,其他层次土壤水分均能满足作物需求。Lü 等^[27]认为田坎的蒸发导致梯田 1/3 的水分损失,因此通过增加梯田田面宽度,减少埂坎的表面积能提高梯田土壤含水量。郭亚莉^[28]分析了宁夏隆德县退耕还林(草)工程与梯田的生态效益,认为退耕还林(草)工程与梯田建设结合能提高水土资源利用效率,是黄土丘陵沟壑区治理水土流失、恢复退化生态系统的根本措施。梯田除了提高土壤含水量外,还能改善水质。梯田湿地能有效降解污染物,进入梯田的污染物浓度随海拔降低呈指数级下降,姚敏等^[29]研究发现哈尼梯田涵养水源的能力为 $5\,050\text{ m}^3/\text{hm}^2$,水质随海拔降低呈现“好-差-好”的垂直特征。

1.2 保持土壤

土壤侵蚀的持续发生,不仅会造成土地资源退化,而且会引起下游河道与湖泊淤积、加剧洪水灾害的发生。同时土壤侵蚀引起的面源污染,还会破坏水资源、加剧干旱地区的水资源危机,严重影响生态系统的可持续性。降雨径流在梯田处受到拦蓄,减轻了径流对沟谷的冲刷,从而减少流域土壤侵蚀与产沙过程。在印度,Sharda 等^[30]发现梯田减水效率最高可达 80%,而减沙效率达 90% 左右。基于埃塞俄比亚提格里州 202 个径流小区的试验结果,Ge-

bremichael 等^[31]发现石坎坡式梯田可减少 68% 因片蚀或面蚀而引起的土壤流失。Shi 等^[4]利用 WA-TEM/SEDEM 分布式模型模拟了三峡库区王家桥流域的侵蚀产沙特征,发现水平梯田能使土壤流失量减少约 17%,产沙量减少约 32%。土壤侵蚀除了受岩性、地形、气候等因素的影响外,还与土地利用和植被覆盖变化有关^[19]。Van Dijk 等^[32]计算了印度尼西亚湿润气候下几乎没有植被覆盖的梯田田坎的土壤流失量可达到 $200\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。当有密集的灌木或草本植物覆盖时,土壤流失量下降 31%。Zuazo 等^[33]发现田坎上有植被定植比裸露时,土壤侵蚀和径流显著减少,种植薰衣草时土壤流失量减少 87.8%,种植迷迭香时减少 79.2%。Arnáez 等^[6]通过收集不同土地利用类型下梯田的侵蚀数据,发现稻田侵蚀率小于 $1\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,木薯或抛荒梯田的侵蚀率高达 $80\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上,野草、生姜或混合旱作梯田的侵蚀量为 $10 \sim 40\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,梯田田坎的侵蚀率最高,达 $200\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上,杂草和其他类型的地被植物对减少土壤流失也起着重要作用。

此外,由于水平梯田在减少自身水沙的同时还会截留上方含沙水流。刘晓燕等^[34]提出,梯田生态系统的减沙作用长期以来都可能被低估,当考虑梯田田面减水减沙作用、梯田对上方水沙的拦截作用以及通过减少坡面径流而减少下游沟谷产沙量的作用时,梯田具有更大的土壤保持作用。但也有一些学者得出截然相反的结论,譬如 Critchley - WRS 等^[35]认为梯田不具有水土保持能力,农业措施会影响梯田内物质比例的再分配,随着梯田数量增多,特别是陡坡地修建的梯田会演变成严重的侵蚀灾害。Bellin 等^[36]则认为梯田的存在增加了两个连续台阶之间的水文梯度,加重梯田边缘的侵蚀,当土壤疏松、易于膨胀时这种现象更为严重。

1.3 改良土质

梯田土壤的物理性质对水分、热量和化学物质的迁移过程起着主导作用,是梯田涵养水源、保障粮食安全、恢复退化生态系统的基础。殷庆元等^[37]以金沙江干热河谷试验区不同土壤类型、修建年限及地埂生物种类的梯田为研究对象,发现与坡耕地相比,新修梯田土壤的抗冲性及抗蚀性无显著变化,甚至有所退化,这可能与土壤结构破坏、原表土剥离和坡改梯初期土壤侵蚀加剧等有关;而随着耕作和管理利用时间的延长,老梯田土壤容重减小、孔隙度增

大,水土保持能力显著增强。Rawat 等^[38]认为坡耕地改为梯田后,在集约农业措施下,梯田土壤结构得到改良,入渗强度增加,但梯田土壤的其他物理性质如土壤稳定性、容重和透水性等基本特征一般不会发生显著变化。在西班牙普里奥拉托,Ramos 等^[39]发现修建梯田后土壤水力传导性和团聚体稳定性下降,并影响梯田边坡的稳定,有导致块体运动增加的风险,可能与梯田耕作年限、土地利用和具体的梯田管理措施有关。

梯田在拦截径流、泥沙,减少侵蚀的同时,也显著影响生态系统 C、N、P 等营养元素的生物地球化学循环,防止养分流失^[38]。梯田土壤养分的分布和变化受海拔、植物群落、土壤理化性质、地貌类型和水文过程等多种因素的影响。Shimeles 等^[11]认为梯田能减少因侵蚀导致的土壤颗粒及养分的流失,水平梯田减小了梯田内的肥力梯度,导致土壤肥力几乎不随梯田修建年限而变化。Abu Hammad 等^[40]在地中海地区的研究发现梯田能减少强降雨诱发的土壤侵蚀,从而增加土壤有机碳(SOC)、Mg、Ca、K 的含量。角媛梅等^[41]研究了元阳县梯田景观中地表水营养物质的时空变化特征,结果表明梯田田水中总氮(TN)和总磷(TP)的含量及其变幅的空间分异都是春季高;梯田区河沟水中营养物质含量变幅在空间上则表现为梯田田水>梯田区河沟水>森林区河沟水的特点。

修建梯田使原地貌发生明显改变,降低水土流失的同时也有效固持土壤有机碳^[13,42]。据 Lal^[43]的估计,全球水土流失治理的固碳潜力为 1.47~3.04 Pg/a。邱宇洁等^[42]以不同年限坡改梯田为研究对象,分析了陇东黄土丘陵区梯田 SOC 的时空分布特征,发现在坡改梯后近 50 a 内,农田 0~60 cm 土层 SOC 处于持续累积状态,20~40 cm 与 40~60 cm 土层 SOC 较坡耕地分别增加 54.6% 和 52.4%。李龙等^[13]认为地形因子和人类活动影响梯田 SOC 的分布,在内蒙古赤峰市研究发现,水平梯田 SOC 含量随坡位的变化均表现为上坡位<中坡位<下坡位,不同坡向上土壤有机碳平均含量表现为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡,人为因素如秸秆还田、免耕等措施有助于提高梯田 SOC 含量。李凤博等^[44]在浙江云和县的研究发现,梯田 SOC 平均密度为 4.14 kg/m²,其变化受地形、土地利用方式及土壤化学性质等因素影响,从坡向看,南北坡比东西坡土壤有机碳密度高,不同土地利用方式下 SOC 密度为果园>

茶园>水田>旱地。

1.4 提高作物产量

水土流失已威胁到世界许多地区的粮食安全与人类福祉,梯田发挥水土保持作用、提高土壤质量的同时也促进了粮食生产的高产稳产。Abu Hammad 等^[3]在巴勒斯坦地区研究了试验小区连续两年的作物产量,前一年修建梯田与未修梯田的干物质量分别为 1 570 kg/hm²、630 kg/hm²,第二年分别为 2 545 kg/hm²、889 kg/hm²。Liu 等^[7]研究发现,黄土高原地区修建 3 a 的梯田产量比坡耕地(>10°)提高 27%,在后续耕作年份,作物产量还将提高 27.07%~52.78%。甘肃庄浪县的梯田面积为 56 679.60 hm²,修建梯田后,粮食产量增加 5×10⁴ t,粮食产值增加约 75 530.72 千元^[9]。在秘鲁安第斯山脉修建水平梯田 2~4 a 后,土壤性质(如肥力、入渗性)并没有明显变化,由于相比临近坡耕地种植密度增加,作物产量提高约 20%^[12]。Sharda 等^[10]在印度半干旱区连续 9 a 的研究发现,水平梯田由于增加作物产量,比传统耕作净现值(NPV)提高 56%,效益成本比增加 6%,梯田面积与传统耕作面积比例为 3:1 时能最有效的提高作物产量,减少极端降雨事件导致的侵蚀风险。Xu 等^[8]在陕西燕沟流域研究了不同地形条件下坡改梯对粮食增产的影响,当原坡地为 15°时,玉米、大豆、绿豆产量分别增加 6.35%、2.8%、1.79%,当原坡地为 25°时,产量分别增加 16.74%、5.58%、4.55%。

1.5 保护生物多样性

生物多样性是人类生存和发展的基础,它决定生态系统的复杂性和稳定性。梯田建设增加区域的景观异质性,有利于促进生态系统的能量流动和物质循环,减小扰动的传播,维护生态系统的生物共生关系^[18,45]。近几十年的集约农业和造林工程导致许多无脊椎动物濒临灭绝,人造栖息地可能为这些生物提供避难场所。Kosulic 等^[46]研究了捷克葡萄园梯田的蜘蛛群落,并调查了从微生境到景观尺度梯田对生物多样性的影响因素,认为梯田建设增加区域景观异质性,有利于保护当地蜘蛛种群的多样性。徐福荣等^[47]采用半问卷式和农村参与式评价方法(PRA),在村寨和农户两个水平,调查了元阳哈尼梯田种植的稻作品种多样性,发现在所调查的 30 个村寨 750 户中,共种植水稻品种 135 种,包括 100 个传统品种,12 个杂交稻组合和 23 个现代育成品种,认为梯田景观的高度异质性和民族文化习俗

是维持哈尼梯田稻作品种多样性的重要因素,并建议将元阳哈尼梯田作为稻作传统品种多样性农家就地保护区。Pereira 等^[17]在葡萄牙的 Sistelo 地区调查发现,农业梯田被橡胶林和灌木林所取代后,其生物多样性减少,供给服务能力下降。

1.6 减缓自然灾害

近年来气候变化已经影响到世界上许多地区的水文、陆地和海洋生态系统。随着全球气候变暖,干旱、洪水、饥饿和瘟疫将成为 21 世纪人类的严重威胁^[48]。水土保持梯田措施能够对降雨径流进行时空再分配,不仅能减少汛期河道洪水量,起到蓄洪作用,而且能够在非汛期对河道径流进行补给,起到补枯的作用,增强生态系统的抗逆能力。吴家兵等^[2]通过对梯田的蓄水拦沙效应、坡改梯水分小循环与河川径流大循环的关系、坡改梯对生态环境演变影响的分析,指出长江上游、黄河上中游的坡改梯工程增强了水分小循环,造成入河水沙量削减,其中减水有利于长江、黄河汛期的防洪减灾;减沙减缓了长江、黄河河道及湖泊水库泥沙的淤积。Sharda 等^[10,30]对印度水平梯田的研究表明,水平梯田能一定程度上控制土壤侵蚀、缓解水资源短缺、减轻洪水灾害等,对干旱地区农业发展具有良好的生态和经济效益。Liu 等^[49]基于 FEMWATER 模型对台湾北部水稻梯田的地下水补给河道径流情况进行分析,结果表明水稻梯田中的 21.2%~23.4% 的灌溉用水可补给地下水。

1.7 精神文化服务

梯田是人类有意识调控和干预自然生态系统而形成的具有特殊乡土智慧的文化景观,具有极高的文化和美学价值。梯田发展历史久远,在不同地理区域往往形成各种独特的梯田文化,即当地少数民族与梯田农耕有关的宗教、民俗、信仰、农耕、节日及祭祀活动等。目前瑞士的拉沃梯田、秘鲁的古印加梯田、菲律宾的巴纳韦梯田,中国的元阳梯田已被列入联合国教科文组织《世纪文化遗产名录》。

我国学者对梯田精神文化价值的研究主要集中于三大古梯田——云南元阳梯田、广西龙脊梯田及湖南紫鹊界梯田。其中最主要的问题包括:哈尼族、苗族、瑶族、壮族等少数民族的社会历史变迁,古梯田的保护与管理,水资源的可持续利用,梯田景区旅游开发及申报世界遗产等。角媛梅等^[41,50]提出了哈尼梯田文化生态系统的概念,对哈尼梯田地表水营养物质的时空变化,景观稳定性,景观空间格局

与美学特征、分形特征,景观多功能的综合评价等多方面进行深入研究,认为民族文化与自然环境的相互适应是梯田文化生态系统得以自我维持的重要原因。广西龙脊梯田具有丰富的自然景观,是农耕文明与少数民族民俗的完美结合,He^[51]提出了进一步推动龙脊梯田旅游开发的对策:包括建立生态博物馆的旅游开发模式,加强社区居民的参与性,结合观光旅游、民俗旅游共同发展。

2 梯田生态系统管理

近一百多年来,全球范围内的 60% 以上的生态系统服务退化,极大损害和威胁人类自身福祉,主要原因之一就是生态系统缺乏科学有效的管理^[52]。梯田生态系统是在大面积、多山和较高人口密度的多重作用下产生的山区土地高效利用方式,是典型的自然-社会-经济复合生态系统,在不同的自然和社会条件下,梯田具有不同的适应方式和工程技术,如梯田的修建、土壤的改良以及水资源的利用和管理等。在世界各地不同的地理气候条件下产生了不同的形式,如水平梯田、反坡梯田、坡式梯田、隔坡梯田和波浪式梯田等^[1]。我国现有的梯田主要是水平梯田,在东北、西北的缓坡地区也有坡式梯田,在干旱地区有隔坡梯田。

2.1 维护梯田质量

梯田的生态系统服务随地理环境因子的差异和梯田的不同质量、利用和管理方式而变化^[1,6]。梯田质量是影响其减水减沙作用大小的关键因素^[53-54]。徐乃民等^[53]按水平梯田质量将其分为 4 类,并指出,在汛期降雨量分别为 400 mm、550 mm 和 660 mm 时,一类梯田可减沙 97%、85%、58%,而三类梯田只能减沙 92%、63% 和 21%。20 世纪 70 年代,在欧盟土地政策及国内外市场需求增加的影响下,西班牙山区一些果园扩展到陡坡或石质山坡等生态脆弱区,大量的葡萄园建设在陡坡地或新修建的不稳定梯田上,导致土壤侵蚀增加^[14]。Schönbrodt 等^[15]认为梯田的维护状态影响其生态系统服务,并利用 TerraCE 模型(Terrace-Condition-Erosion)评估了梯田状态的空间变异性,将三峡库区香溪河流域梯田分为 4 类:维护良好(20%)、维护不好(48%)、部分坍塌(15%)、完全坍塌(6%),并发现梯田的坍塌与人为干扰有关,随着与道路和社区的距離越近,梯田损毁程度越高。Shrestha^[55]等

认为人造梯田坍塌是导致尼泊尔山坡土地退化的原因之一,从这个方面来看,土地退化的主要影响因素是梯田修建技术而不是梯田荒废。

2.2 改良梯田结构

一般而言,梯田田坎的侵蚀率比田面台阶高,这主要与坡度和植被覆盖有关,山坡尺度上梯田的退化可以通过合理维护梯田埂坎,优化排水系统和增加天然植被覆盖度等措施得以缓解。Cao等^[56]基于生物多样性和景观生态学原理设计的软硬梯田,将树木、牧草、水保经济作物栽植在田坎外坡面,在工程技术上采用接近黄土自然休止角 35° 为梯田埂坎设计坡度,力图最大限度降低地埂重力侵蚀危害。Chow等^[24]在加拿大新布伦斯威克对梯田-草皮水道系统的水土保持效益研究发现,实施梯田、等高耕作、变坡引水渠和草皮水道等措施,每年可减少区域径流150 mm,从而增加作物可利用水分,同时土壤流失量也降至 $100\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

梯田的结构往往随地形、土壤资源和传统耕作技术的不同而异。在长江中上游,Zhang等^[57]利用 ^{137}Cs 同位素示踪技术评估了有坎和无坎梯田对土壤颗粒再分配的影响,发现建有田埂的梯田,耕作侵蚀主导坡面土壤再分配过程(占总侵蚀的65%~71%),水蚀起较小作用;而无田埂的梯田,耕作和水蚀对土壤再分配过程均起着重要作用,导致坡地土壤净流失严重。焦菊英^[54]在黄土高原的研究发现,当次降雨量与最大30 min雨强的乘积 PI_{30} 为 $4.4 \sim 45\text{ mm}^2/\text{min}$ 时,有埂水平梯田的减水减沙作用均达100%,而无埂水平梯田的减水减沙作用分别为82%和95%。梯田田埂在土壤再分配过程中起着关键作用:使坡面从水蚀主导的侵蚀过程向耕作主导的侵蚀过程转变,因此在坡改梯工程中,建立平行于等高线的梯田田埂是一个重要的措施^[57]。

Schiettecatte等^[58]在突尼斯东南部Amrich jessr利用连续3 a的降雨、入渗数据评估了梯田生态系统的水量平衡,认为方形蓄水池与梯田措施结合能有效提高作物可利用水分,且这一作用在干旱年尤为突出,并计算得出在年均降水量为235 mm的条件下,方形蓄水池面积/梯田面积至少为7.4时才能为作物生长提供足够的水分。梁改革等^[59]提出“梯田+水窖”模式,不仅能够对隔坡梯田降雨径流在时空上进行合理再分配,一定程度上解决作物水资源需求与天然水分供给在时间上的错位问题,而且能够发挥“适时”补充作物亏缺水的功效;采取“梯

田+水窖”模式后春玉米年产量以及水分利用效率、降水利用效率均增加50%以上,且能有效防止水土流失。

2.3 合理的土地利用方式

梯田作为典型的人地耦合系统,其稳定性与气候、土壤、地形、植被和土地利用等众多因素有关。梯田田面种植的各种农作物以及坡面的林草防护措施增加坡面径流阻力,进一步延长坡面水分的入渗时间^[38]。李仕华^[9]研究了不同种植条件下梯田土壤水分的变化情况,发现土层0~2 m深度处,种植豆科作物和玉米的梯田土壤平均含水量分别为14.76%、13.29%,而果园梯田土壤平均含水量仅为11.98%。Al Ali等^[60]在突尼斯中部通过对耕作和荒废条件下的土坎水平梯田的研究发现,水平梯田结合保护性耕作措施能减少44%~75%的土壤侵蚀,而弃耕梯田的土壤侵蚀是耕作梯田的2倍。Stavi等^[45]基于对2 a、9 a造林整地和天然林的系统比较,发现北坡比南坡的土壤质量和草本覆盖度稍高,等高水平梯田增加了山坡尺度的景观多样性,但是大面积的表土搬离使土壤紧实度在短期内有所增加,草本植被的生产力降低,对土壤质量、牧草生产力、生态系统健康造成不利影响;而经过长期的恢复,梯田造林系统的土壤质量提高,草本植被的生产力增加。

梯田虽然具有涵养水源的功能,但在半干旱区降水量不能满足作物的生长需求时,田坎的侧向蒸发会加剧梯田生态系统的土壤水分亏缺,埂坎高度和梯田的田面坡度是影响梯田保墒能力的主要因素。此外梯田结构和地表覆盖也影响土壤侵蚀的严重程度,埂坎种草能有效减少侵蚀、增强梯田的稳定性^[56,61]。张玉等^[62]通过对湟源北极山坡地梯田退耕还林工程连续9 a的观测,认为把沙棘、柠条种植在坡埂边缘地带,作为生态护坡和放牧兼用植物,从而构成林草复合生态系统,合理利用光能、空间和土壤肥力等自然资源,增加单位面积产量,而在梯田内,应定期进行草地常规管理,如雨季追施氮肥,适当补播豆科牧草,清理杂草等。由于我国各地年降水量的分布不均匀,因此梯田的灌溉条件也不同,根据有无灌溉条件可分为稻作梯田、灌溉梯田和无灌溉的旱作梯田。

2.4 优化自然-社会-经济复合生态系统

生态脆弱区往往与贫困和经济落后联系在一起,人口压力不仅会减少植被覆盖,而且改变景观面

貌,因此生态脆弱区水土流失可能与系统自身潜在的脆弱性有关,但其水土流失加剧、土地退化和无法自我恢复的更深层次原因则是人地矛盾日益尖锐的结果^[63]。20世纪中叶以后,在一些劳动力密集且产量低的地区,梯田因其修筑费工,又碍耕作,且不利于农业机械化,加上人口、社会和经济的发展变化,梯田的土壤保持措施一度中止,大量的农业梯田遭到荒废。这一现象在葡萄牙、西班牙、法国、意大利、希腊、日本等许多国家和地区均有发生^[6,39,42]。Inbar 和 Llerena^[64]评价了秘鲁安第斯山脉中部人类活动变化对生态脆弱区梯田的影响,认为梯田弃耕和退化是自然、社会、历史、经济综合作用的结果,例如土地利用变化、土地所有制、梯田与村落之间的距离、社区凝聚力等均影响梯田生态系统的可持续性。

梯田的修建与维护需要耗费大量的劳动力和资金,Bizozza 和 de Graaff^[65]认为劳动力和肥料的成本是梯田能否获得收益的最大影响因素,基于市场价值的效益分析显示水平梯田难以获得收益,而基于劳动力和肥料的机会成本分析则显示梯田措施具有可观的收益。Fu 等^[66]评估了景观和土地利用变化与农耕措施和社会经济变化之间的关系,并指出梯田农业在经济效益上处于劣势。因此,如何更科学的管理和优化梯田生态系统,最大限度发挥其综合效益,是今后学术研究和生产实践中需要重点关注的一大课题。

Xu 等^[8]认为黄土高原小于 5° 的坡地可继续保留为农田进行耕作,而在 15° 以上的坡地应尽快修建梯田或退耕还林(草),并发现坡改梯与退耕还林(草)在提高农业生产条件、保障粮食安全、提高植被的长期覆盖度和防治水土流失方面具有同样显著的效益。Liu 等^[67]对云南哈尼梯田农户在不同化肥、农药施用限制下受偿意愿进行调查,包括接受直接补贴的意愿和接受市场调控提高农产品价格的意愿,构建了稻田生态补偿机制的动态补偿标准,同时通过分析政府的直接补贴及其产生的生态环境效益,评估了政府投入的产出效果。Bekele 等^[68]提出水土保持决策、技术与传统的耕作模式相悖,影响了本土居民传统的农业生产活动,存在着决策者与基层实施者、期望值与实际生产之间的矛盾。

3 总结及展望

梯田生态系统在保持水土、减缓自然灾害、提高

土壤肥力和碳汇储量、保障粮食安全、促进生态恢复等方面都有显著效益。传统梯田一般修建于山坡上,用于开发耕地,调节水循环,保持土壤;当前也因集约农业的发展需要而修建。随着当前科学技术与社会经济的发展,梯田或被荒废、或被过度开发、或污染严重,导致梯田侵蚀坍塌、土地退化、梯田文化流失、梯田生态系统长期形成的天地人和关系面临威胁和挑战。梯田是一种特殊的自然-社会-经济复合生态系统,未来如何对梯田生态系统进行科学管理,进一步实现梯田生态系统的可持续发展,充分发挥其生态系统服务、增进人类福祉,是当前梯田建设的重要任务。鉴于此,有关梯田建设还存在以下亟待解决的问题:

建立可持续的梯田生态系统管理的量化目标和任务,平衡不同生态服务与社会需求之间的关系,调节供给服务与文化服务间的关系,使经济发展和 社会进步决策不损害梯田生态系统的健康发展。长期以来,梯田所体现的人地关系和谐的思想并未受到应有的重视,另外也鲜有学者从整个国土的角度或人类生存的角度审视梯田建设的价值及其在不同地区的适应性。在不同地理区域,均可发现不同用途、类型和修建年限的梯田,这种多样性也导致了梯田生态系统服务的差异,此外研究方法的多样化和梯田设计标准的差异也使得很难就这一主题建立一个适用于全球或全国的评估体系。

梯田增加入渗,减少泥沙运移,改变流域内水文地貌的连通性,这一过程可能受到研究区地理环境特征、梯田生态系统管理和利用等因素的影响。已有大量研究涉及到耕作或抛荒梯田对坡面或流域侵蚀过程的影响,对于径流运移至河网的影响或梯田水文地貌动态的后果、梯田演化和植被覆盖变化导致的山坡与河床间径流、泥沙的连通性还缺乏相关的研究。梯田之外,还要考虑梯田赖以存在的水源保护,加强渠系建设,确保水资源的调配和分流,并根据梯田的稳定程度,对陡坡梯田采取适当的工程措施予以维护。

梯田整地措施对农业生产具有重要作用,但是其经济效益受到社会、地理、气候等条件的影响,这些问题还未得到广泛的研究。梯田的建设与维护需要大量劳动力和资金成本,梯田减少侵蚀,提高土壤持水能力,增加作物产量,因此也需要更多的劳动力投入。在当前社会经济背景下的农村适龄劳动力转移,大面积的梯田被闲置、抛荒导致了严重的

坡面坍塌和土地退化,影响梯田生态系统的稳定,威胁区域粮食、生态和社会安全。建议今后的研究在探讨梯田建设、利用和荒废过程与气候变化、国家政策、人口变迁等因素关系的基础上,根据不同地区各类梯田的不同开发利用模式构建相应的保护机制,建立和完善梯田生态补偿机制,为梯田生态系统管理提供强有力的政策支持和稳定的资金渠道,从法律、制度的角度对补偿行为予以规范化、体系化,以维持梯田生态系统的可持续性、保障粮食安全和社会稳定。

参考文献(References)

- [1] Luuk D, Freddy R. A review of the effect of terracing on erosion [J/OL]. Soil Conservation and Protection for Europe, 2004: 97 – 108 [2015 – 09 – 30] http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/scape/transf/Dorren_Rey.pdf
- [2] 吴家兵,裴铁璠. 长江上游、黄河上中游坡改梯对其径流及生态环境的影响 [J]. 国土与自然资源研究, 2002, (1): 59 – 61 [Wu Jiabing, Pei Tiefan. Effects of sloping fields terraced on runoff and eco-environment in upper reaches of Yangtze River and in upper and middle reaches on Yellow River [J]. Territory and Natural Resources Study, 2002, (1): 59 – 61]
- [3] Abu Hammad A, Haugen LE, Børresen T. Effects of stonewalled terracing techniques on soil-water conservation and wheat production under Mediterranean conditions [J]. Environmental Management, 2005, 34(5): 701 – 710
- [4] Shi ZH, Ai L, Fang NF, et al. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: a case study in the Three Gorges Area, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 438: 156 – 167
- [5] Wei W, Chen LD, Yang L, et al. Microtopography recreation benefits ecosystem restoration [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(20): 10875 – 10876
- [6] Arnáez J, Lana – Renault N, Lasanta T, et al. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review [J]. Catena, 2015, 128: 122 – 134
- [7] Liu XH, He BL, Li ZX, et al. Influence of land terracing on agricultural and ecological environment in the loess plateau regions of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(4): 797 – 807
- [8] Xu Y, Yang B, Tang Q, et al. Analysis of comprehensive benefits of transforming slope farmland to terraces on the Loess Plateau: a case study of the Yangou Watershed in Northern Shaanxi Province, China [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(3): 448 – 457
- [9] 李仕华. 梯田水文生态及其效应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011. [Li Shihua. Research on hydro-ecology of terrace and its effect [D]. Xi'an, China: Chang'an University, 2011.]
- [10] Sharda VN, Dogra P, Sena DR. Comparative economic analysis of inter-crop based conservation bench terrace and conventional systems in a sub-humid climate of India [J]. Resources Conservation and Recycling, 2015, 98: 30 – 40
- [11] Shimeles D, Tamene L, Vlek P. Performance of farmland terraces in maintaining soil fertility: a case of Lake Maybar watershed in Wello, Northern Highlands of Ethiopia [J]. Journal of Life Sciences, 2012, 6: 1251 – 1261
- [12] Posthumus H, Stroosnijder L. To terrace or not: the short-term impact of bench terraces on soil properties and crop response in the Peruvian Andes [J]. Environment, Development and Sustainability, 2010, 12(2): 263 – 276
- [13] 李龙,姚云峰,秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2930 – 2935 [Li Long, Yao Yunfeng, Qin Fucang. Distribution and affecting factors of soil organic carbon of terraced fields in Chifeng, Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 2930 – 2935]
- [14] Cots – Folch R, Martinez – Casasnovas JA, Ramos MC. Land terracing for new vineyard plantations in the north-eastern Spanish Mediterranean region: Landscape effects of the EU council regulation policy for vineyards' restructuring [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2006, 115(1–4): 88 – 96
- [15] Schonbrodt – Stitt S, Behrens T, Schmidt K, et al. Degradation of cultivated bench terraces in the Three Gorges Area: Field mapping and data mining [J]. Ecological Indicators, 2013, 34: 478 – 93
- [16] Meerkerk AL, Van Wesemael B, Bellin N. Application of connectivity theory to model the impact of terrace failure on runoff in semi-arid catchments [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(19): 2792 – 2803
- [17] Pereira E, Queiroz C, Pereira HM. Ecosystem services and human well-being: A participatory study in a mountain community in Northern Portugal [J]. Ecology and Society, 2005, 10(2): 14
- [18] Fahrig L, Baudry J, Brotons L, et al. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes [J]. Ecology Letters, 2011, 14(2): 101 – 112
- [19] Zuazo VHD, Ruiz JA, Raya AM, et al. Impact of erosion in the taluses of subtropical orchard terraces [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 107(2–3): 199 – 210
- [20] Lesschen JP, Schoorl JM, Cammeraat LH. Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity [J]. Geomorphology, 2009, 109(3–4): 174 – 183
- [21] Gardner RAM, Gerrard AJ. Runoff and soil erosion on cultivated rainfed terraces in the Middle Hills of Nepal [J]. Applied Geography, 2003, 23(1): 23 – 45
- [22] Gallart F, Llorens P, Latron J, et al. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(3): 527 – 537
- [23] 康玲玲,张宝,甄斌,等. 多沙粗沙区梯田对径流影响的初步分析 [J]. 水力发电, 2006, 32(12): 16 – 19 [Kang Linlin, Zhang Bao, Zhen Bin, et al. Preliminary analysis of the runoff influence on the terrace in areas of coarse sands and strong erosion

- [J]. *Water Power* 2006 ,32(12) :16 – 19]
- [24] Chow TL , Rees HW , Daigle JL. Effectiveness of terraces grassed waterway systems for soil and water conservation: a field evaluation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* ,1999 ,54(3) :577 – 583
- [25] 李艳梅,王克勤,刘芝芹,等. 云南干热河谷不同坡面整地方式对土壤水分环境的影响[J]. *水土保持学报*,2006 ,20(1) :15 – 19 [Li Yanmei , Wang Keqin , Liu Zhiqin , et al. Effect of measure of engineering preparation to soil water in Yunnan dry-hot river valley [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2006 ,20(1) :15 – 19]
- [26] 张玉斌,曹宁,武敏,等. 黄土高原南部水平梯田的土壤水分特征分析[J]. *中国农学通报*,2005 ,21(8) :215 – 220 [Zhang Yubin , Cao Ning , Wu Min , et al. Analysis on soil moisture character of level terrace on the south Loess Plateau [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* ,2005 ,21(8) :215 – 220]
- [27] Lü H , Zhu Y , Skaggs TH , et al. Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau , China [J]. *Agricultural Water Management* ,2009 ,96(2) :299 – 306
- [28] 郭亚莉. 退耕还林(草) 工程与梯田关联生态效益分析—以宁夏隆德县为例 [J]. *安徽农业科学* ,2007 ,35(15) :4611 – 4613 [Guo Yali. Analysis of the ecological efficiency from the forestry/grass construction in farmland connected with the terraced field [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* ,2007 ,35(15) :4611 – 4613]
- [29] 姚敏 崔保山. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征[J]. *生态学报* ,2006 ,26(7) :2115 – 2124 [Yao Min , Cui Baoshan. The vertical characteristics of ecosystem of Hani' s terrace paddy field in Yunnan , China [J]. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 ,26(7) :2115 – 2124]
- [30] Sharda VN , Juyal GP , Singh PN. Hydrologic and sedimentologic behavior of a conservation bench terrace system in a sub-humid climate [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* ,2002 ,45(5) :1433 – 1441
- [31] Gebremichael D , Nyssen J , Poesen J , et al. Effectiveness of stone bunds in controlling soil erosion on cropland in the Tigray Highlands , northern Ethiopia [J]. *Soil Use and Management* ,2005 ,21:287 – 297
- [32] Van Dijk AIJM , Bruijnzeel LA , Wiegman SE. Measurements of rain splash on bench terraces in a humid tropical steep-land environment [J]. *Hydrological Processes* ,2003 ,17(3) :513 – 535
- [33] Zuazo VHD , Pleguezuelo CRR , Peinado FJM , et al. Environmental impact of introducing plant covers in the taluses of terraces: implications for mitigating agricultural soil erosion and runoff [J]. *Catena* ,2011 ,84(1 – 2) :79 – 88
- [34] 刘晓燕,王富贵,杨胜天,等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J]. *水力学报* ,2014 ,45(7) ,793 – 800 [Liu Xiaoyan , Wang Fugui , Yang Shengtian , et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,2014 ,45(7) ,793 – 800]
- [35] Critchley WRS , Bruijnzeel LA. Terrace risers: erosion control or sediment source? [J]. *Sustainable reconstruction of highland and headwater regions* ,1995 ,17:529 – 554
- [36] Bellin N , Van Wesemael B , Meerkerk A , et al. Abandonment of soil and water conservation structures in Mediterranean ecosystems: a case study from south east Spain [J]. *Catena* ,2009 ,76(2) :114 – 121
- [37] 殷庆元,王章文,谭琼,等. 金沙江干热河谷坡改梯及生物地埂对土壤可蚀性的影响[J]. *水土保持学报* ,2015 ,29(1) :41 – 47 [Yin Qingyuan , Wang Zhangwen , Tan Qiong , et al. Effect of terracing slope cropland and bio-bank on soil erodibility in dry-hot valley of Jinsha river basin , southwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2015 ,29(1) :41 – 47]
- [38] Rawat JK , Sohani SK , Varun Joshi , et al. Application of computer for terrace grading design by plane method [J]. *Journal of Soil Conservation* ,1995 ,23:65 – 68
- [39] Ramos M C , Cots – Folch R , Martinez – Casasnovas J A. Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in North-eastern Spain: A multivariate analysis [J]. *Geoderma* ,2007 ,142(3 – 4) :251 – 261
- [40] Abu Hammad H , Børresen T , Haugen LE. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean [J]. *Soil and Tillage Research* ,2006 ,87(1) :39 – 47
- [41] 角媛梅,张贵,王宇,等. 哈尼梯田景观地表水营养物质的时空变化[J]. *生态学杂志* ,2009 ,28(9) :1787 – 1793 [Jiao Yuanmei , Zhang Gui , Wang Yu , et al. Spatiotemporal changes of surface water nutrients in Hani terraced landscape [J]. *Chinese Journal of Ecology* ,2009 ,28(9) :1787 – 1793]
- [42] 邱宇洁,许明祥,师晨迪,等. 陇东黄土丘陵区坡改梯田土壤有机碳累积动态 [J]. *植物营养与肥料学报* ,2014 ,20(1) :87 – 98 [Qiu Yujie , Xu Mingxiang , Shi Chengdi , et al. Dynamic accumulation of soil organic carbon of terrace changed from slope cropland in the hilly loess plateau of eastern Gansu Province [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* ,2014 ,20(1) :87 – 98]
- [43] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon [J]. *Advances in Agronomy* ,2001 ,71:145 – 191
- [44] 李凤博,蓝月相,徐春春,等. 梯田土壤有机碳密度分布及影响因素 [J]. *水土保持学报* 2012 ,26(1) :179 – 183 [Li Fengbo , Lan Yuexiang , Xu Chunchun , et al. Distribution and affecting factors of soil organic carbon density in terraced fields [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* . 2012 ,26(1) :179 – 183]
- [45] Stavi I , Fizik E , Argaman E. Contour bench terrace (shich / shikim) forestry systems in the semi-arid Israeli Negev: Effects on soil quality , geodiversity , and herbaceous vegetation [J]. *Geomorphology* ,2015 ,231:376 – 382
- [46] Kosulic O , Michalko R , Hula V. Recent artificial vineyard terraces as a refuge for rare and endangered spiders in a modern agricultural landscape [J]. *Ecological Engineering* ,2014 ,68:133 – 142
- [47] 徐福荣,汤翠凤,余腾琼,等. 中国云南元阳哈尼梯田种植的稻作品种多样性[J]. *生态学报* ,2014 ,30(12) :3346 – 3357 [Xu Furong , Tang Cuifeng , Yu Tengqiong , et al. Diversity of paddy rice varieties from Yuanyang Hani' s terraced fields in Yun-

- nan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 30(12): 3346 – 3357]
- [48] Vorosmarty CJ, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth [J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284 – 288
- [49] Liu CW, Huang HC, Chen SK, et al. Subsurface return flow and ground water recharge of terrace fields in northern Taiwan [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 603 – 614
- [50] 角媛梅. 哈尼梯田文化生态系统研究[J]. *人文地理*, 1999, 14(增1): 56 – 59 [Jiao Yuanmei. Study on the cultural ecology system of Hani terraced field [J]. *Human Geography*, 1999, 14(Suppl. 1): 56 – 59]
- [51] He J W. The exploitation of agricultural civilization heritages of minority community in Guangxi——a case study of Longsheng dragon back terrace [J]. *Journal of Landscape Research*, 2010, 06: 80 – 83
- [52] Daily GC, Polasky S, Goldstein J, et al. Ecosystem services in decision making: time to deliver [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21 – 28
- [53] 徐乃民, 张金慧. 水平梯田蓄水减沙效益计算探讨[J]. *中国水土保持*, 1993, (3): 36 – 38 [Xu Naimin, Zhang Jinhui. Shui ping ti tian xu shui jian sha xiao yi tan tao [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1993, (3): 36 – 38]
- [54] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. *水土保持学报*, 1999, 5(3): 59 – 63 [Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in loess hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3): 59 – 63]
- [55] Shrestha DP, Zinck JA, Van Ranst. Modeling land degradation in the Nepalese Himalaya [J]. *Catena*, 2004, 57(2): 135 – 156
- [56] Cao SX, Chen L, Feng Q, et al. Soft-riser bench terrace design for the hilly loess region of Shaanxi Province, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1–2): 184 – 191
- [57] Zhang JH, Wang Y, Zhang ZH. Effect of terrace forms on water and tillage erosion on a hilly landscape in the Yangtze River Basin, China [J]. *Geomorphology*, 2014, 216: 114 – 124
- [58] Schiettecatte W, Ouessar M, Gabriels D, et al. Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: a case study on a micro catchment in southeastern Tunisia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(2): 297 – 313
- [59] 梁改革, 高建恩, 韩浩, 等. 基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 09(1): 24 – 32 [Liang Gaige, Gao Jian'en, Han Hao, et al. Optimization of structure of slope-separated terrace based on crop water requirement and control of rainfall runoff [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 09(1): 24 – 32]
- [60] Al Ali Y, Touma J, Zante P, et al. Water and sediment balances of a contour bench terracing system in a semi-arid cultivated zone (El Gouazine, central Tunisia) [J]. *Hydrological Sciences Journal – Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2008, 53(4): 883 – 892
- [61] Li XH, Yang J, Zhao CY, et al. Runoff and sediment from orchard terraces in southeastern China [J]. *Land Degradation and Development*, 2014, 25(2): 184 – 192
- [62] 张玉, 王力争, 王宝山. 湟源北坡山地梯田退耕还林还草效果研究[J]. *中国水土保持*, 2009, (5): 17 – 20 [Zhang Yu, Wang Lizheng, Wang Baoshan. Effect of conversion of cropland to forest and grassland in terraced of Beiji hill in Huangyuan [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009, (5): 17 – 20]
- [63] Lutz E, Pagiola S, Reiche C. The costs and benefits of soil conservation: the farmers' viewpoint [J]. *Oxford Journals*, 1994, 9(2): 273 – 295
- [64] Inbar M, Llerena CA. Erosion processes in high mountain agricultural terraces in Peru [J]. *Mountain Research Developments*, 1999, 20(1): 72 – 79
- [65] Bizozza AR, De Graaff J. Financial cost-benefit analysis of bench terraces in Rwanda [J]. *Land Degradation and Development*, 2012, 23(2): 103 – 115
- [66] Fu BJ, Hu CX, Chen LD, et al. Evaluating change in agricultural landscape pattern between 1980 and 2000 in the Loess hilly region of Ansai County, China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 114(2): 387 – 396
- [67] Liu MC, Xiong Y, Yuan Z, et al. Standards of ecological compensation for traditional eco-agriculture: Taking rice-fish system in Hani terrace as an example [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4): 1049 – 1059
- [68] Bekele W, Drake L. Soil and water conservation decision behavior of subsistence farmers in the eastern highlands of Ethiopia: a case study of the hunde-lafto area [J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 437 – 451

Progress of the Ecosystem Services and Management of Terraces

CHEN Die^{1 2}, WEI Wei¹, CHEN Liding¹, YU Yang¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China;

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

Abstract: Terrace is important agricultural ecosystems. As modifying hillslope topography, changing slope steepness and shortening slope length, steep slopes were converted into an artificial sequence of relatively flat surfaces, which can considerably minimize runoff and sediment yield only when terrace ecosystems were well planned, correctly constructed and properly maintained. Terracing can play key roles for soil and water conservation, ecological restoration and agriculture efficiency, and it thus alter the pattern of water and soil conservation, mitigating natural disasters, reducing soil nutrient loss and function as a sink for atmospheric carbon sequestration. Moreover, terraces can change the conditions of crop growth due to runoff retention and better utilization of available water and heat. In turn, it can enhance crop resistance to drought and disease and consequently increase crop yields. Accordingly, terraces can increase landscape heterogeneity, provide habitat and corridors for biodiversity, and improve the local agricultural environment and the carrying capacity of land. In some areas, terraced landscapes can be considered as a historical and cultural heritage and tourist attraction. However, when they were abandoned, terraced landscapes are subjected to serious degradation due to erosion process and slope collapse. Under climate change and socioeconomic development, transforming the cognition of terraced ecosystem services into effective protection and management is of great significance to improve human welfare and enhance the sustainable development of terraced ecosystems. In this paper, the research of terraced ecosystem services and management were summarized, and it was considered that more attention should be paid to the problems regarding a nature-society-economy complex ecosystem with a harmonious human-earth relationship, including quantitative objectives and tasks of terraced ecosystem management, the dynamic of hydrological and geomorphologic terraced landscape as well as the effects of vegetation restoration at various scales.

Key words: terrace; ecosystem service; ecosystem management; soil and water conservation; ecological restoration