

文章编号: 1008 - 2786 - (2019)2 - 151 - 10

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000409

三峡水库消落带优势草本植物对土壤氮磷的吸收富集特征

王正^{1,2,3}, 肖丽微^{1,2,3}, 谭秋霞^{1,2,3}, 田琳琳^{1,2,3}, 朱波^{1,2*}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 三峡水库消落带春夏出露, 植物生长茂盛, 可能拦蓄提取大量库区营养盐, 研究消落带植物对氮磷养分的富集特征及其种间差异将为三峡消落带高效截污植被的筛选与重建提供重要基础数据。本文通过三峡水库消落带实地调研, 采集典型草本植物, 测定生物量和养分含量, 计算富集系数和养分累积吸收量, 从生态计量角度分析种间差异。结果表明, (1) 三峡水库消落带优势植物主要为草本植物, 优势草本植物有苍耳、青蒿、籽粒苋、铁线蕨、鬼针草、水蓼、稗草、空心莲子草、狗牙根、牛鞭草等。地上生物量的种间差异显著, 苍耳和青蒿的地上生物量最高, 铁线蕨地上生物量最低。(2) 不同种类草本植物的氮磷吸收富集能力差异显著, 苍耳和水蓼的氮富集系数最高; 狗牙根和青蒿对磷的富集系数最高, 苍耳和青蒿氮磷累积吸收量最高。另据植物对氮磷的富集系数、累积吸收量和其地上生物量, 可将消落带草本植物分为 5 类: 强氮磷富集型(苍耳和青蒿)、氮富集型(籽粒苋)、磷富集型(狗牙根)、弱磷富集型(水蓼和空心莲子草)、弱氮磷富集型(稗草、鬼针草、铁线蕨和牛鞭草)。(3) 若仅考虑植物对消落带土壤(底泥)的养分吸收, 强富集型和富集型植被具有更强的光合吸收提取效率, 生态截污能力强, 因此, 消落带截污植被恢复草本可选苍耳、青蒿、籽粒苋、狗牙根等。

关键词: 三峡水库; 消落带; 草本植物; 氮磷养分; 富集能力; 生态计量特征

中图分类号: S151.9

文献标志码: A

消落带(Water-Level-Fluctuation Zone, WLFZ)是指水陆衔接地带受自然或人为调控因素影响, 水位季节性涨落使土地周期性出露和淹没的区域^[1]。三峡水库因采用“蓄清排浑”的调度方式, 汛期(5—9月)保持低水位 145 m, 秋冬(10月—次年 1月)蓄水至高水位 175 m, 形成落差约 30 m, 长约 5578 m, 面积约 349 km² 的巨大消落带^[2]。消落带经历反复的淹没与出露, 土壤理化性质发生变化, 其营养元素含量和形态特征也发生相应改变^[3-5], 在

受到淹水浸泡后, 土壤中的营养物质如氮磷等元素更易通过溶解、交换、扩散作用迁移至上覆水中^[4-5]。作为消落带生态系统的重要组成部分, 植被对水土流失和面源污染控制有显著的缓冲和削弱作用^[6]。三峡消落带的植被恢复, 可固持土壤养分, 减少土壤在雨季降水冲刷作用下进入水体的营养负荷; 在淹水前对植被进行刈割、回收, 可进一步减少土壤—植物系统向三峡水体养分释放负荷。目前, 国内对三峡消落带的研究多关注反复淹水—落

收稿日期(Received date): 2018 - 10 - 28; 改回日期(Accepted date): 2019 - 04 - 09

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41430750)。[Key Project of the National Natural Science Foundation of China (41430750)]。

作者简介(Biography): 王正(1991 -), 男, 硕士研究生, 安徽凤阳人, 主要从事土壤养分循环研究。[WANG Zheng (1991 -), male, born in Fengyang, Anhui province, M. Sc. candidate, research on soil nutrients cycle] E-mail: 15955369833@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 朱波(1966 -), 男, 研究员, 主要从事土壤氮循环研究。[ZHU Bo (1966 -), male, Ph. D., professor, specialized in soil nitrogen cycle] E-mail: bzhu@imde.ac.cn

干后土壤理化性质的变化^[7-8], 重金属迁移转化污染^[9-11]、土壤氮磷养分吸附-解吸^[12-14]以及淹水条件下植物分解和养分释放等方面^[15-17]。同时, 三峡水库消落带的植被恢复重建一直为学者所关注^[18-19]。植物物种的选择多侧重于耐淹性^[20-21], 但消落带植被吸收固定土壤氮磷养分这一重要功能却少见报道。研究表明, 对氮磷富集土壤进行植物修复是减少水体营养负荷的有效途径^[22], 因此本文针对此类问题开展研究。

碳、氮、磷的相互作用及与环境的关系共同决定了植物的营养状况和长势^[23-24], 进而影响植物对土壤养分的吸收与富集。植物养分生态化学计量特征反映了其对生长环境的响应, 对资源的竞争利用策略^[25]。植物碳/氮/磷(C/N/P)是营养动态、凋落物分解、养分限制等生态过程重要的影响因子, 与植物生长速率密切相关^[26]。其中, 氮磷养分对植物生长尤为重要, 植物对氮磷的吸收利用显著影响植物生长速率^[27], 可据此分析优势植物长势和养分吸收能力的种间差异。

本文通过三峡水库腹心段消落带野外实地调查采样, 查明三峡消落带的主要优势植物种, 分析典型优势草本植物对土壤氮磷的吸收特征, 进一步完善

对消落带植被生态功能的认知, 为三峡水库消落带植被恢复物种的选择提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区总面积 5.67 万 km² (105°44' ~ 111°39'E, 28°32' ~ 31°44'N)^[28]。水库消落带涉及重庆市和湖北省 20 个县(市、区), 其中, 重庆段消落带面积 306.3 km², 占库区消落带总面积的 87.8%; 湖北段消落带面积 42.7 km², 占 12.2%^[29]。三峡水库属亚热带季风气候, 气候温和湿润, 年平均降水量 1000 ~ 1800 mm, 主要集中在雨季(5—9 月), 年平均气温 16.7 °C ~ 18.7 °C。

1.2 实验设计

2011 年 9 月 14—21 日在三峡水库消落带(WLFZ)长寿至开州段的典型干流消落带和库湾消落带实地调研, 调查区域有长寿龙溪河, 涪陵乌江、珍溪河和渠溪河, 丰都龙河, 忠县汝溪河、石宝干流、黄金河、香水干流、烧泥函、坪山大桥, 云阳澎溪河、磨刀溪、汤溪河、小江, 开州区南河和澎溪河等, 共设置 56 个采样点(图 1), 每个采样点设置 3 个植物样

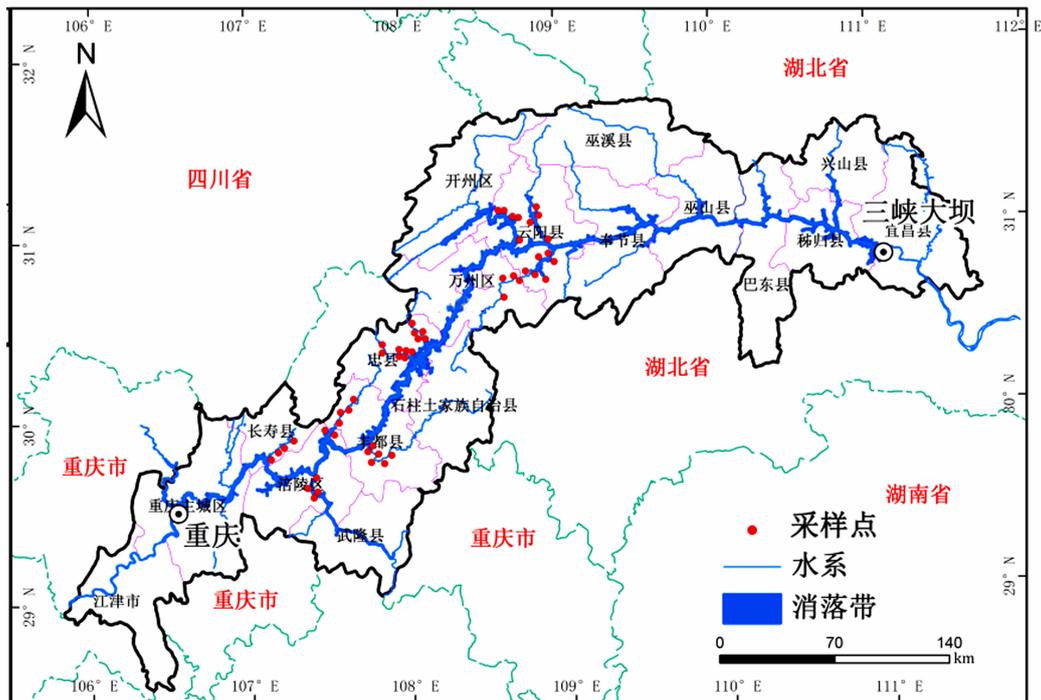


图 1 采样点分布示意图

Fig. 1 Sampling point distribution diagram

方和土壤样点。前期研究表明,由于三峡库区消落带周期性的淹水-出露,消落带植被演替趋同,以草本植物为主,植物类型的区域差异不显著^[30]。因此,分别在不同地区选择分布均匀、长势良好的样方(1 m×1 m),齐地刈割植物地上部分,按植物种类分别装入尼龙网袋,同时采集样方内对应的表层土壤(0~10 cm),带回实验室调查植物种类,烘干测定生物量和土壤、植物养分含量。

1.3 养分测定

土壤样品风干磨碎、植物样品烘干粉碎过筛后(土样过100目筛,植物样过60目筛),测定土壤有机碳(SOC)和植物全碳(TC)及土壤和植物全氮(TN)和全磷(TP)含量^[31]。使用重铬酸钾-硫酸氧化法测定SOC和植物TC含量;用凯氏定氮法测定TN含量;用钼蓝比色法测定TP含量。

1.4 数据处理

植物富集系数(Enrichment Coefficient, EC)可以用植物体内某元素的含量与对应土壤的相应元素含量的比值来表示^[32],计算公式如下:

$$E = \frac{P_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, E 为植物对土壤养分富集系数; P_i 为植物的 i 养分(即氮磷,下同)含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); S_i 为植物对应点的土壤的 i 养分含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。对应样点土壤和各优势草本植物氮磷含量分别列于表1和表2。

植物养分总吸收量(P_A),单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,计算公式如下:

$$P_A = P_C \times B \quad (2)$$

式中, P_A 为植物养分总吸收量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); P_C 为植物体内氮(磷)含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); B 为植物地上生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

数据经Excel 2010处理后,采用One way-ANOVA方法对数据进行显著性分析,比较不同样点的土壤养分含量差异和植物地上生物量、养分含量的种间差异,用最小显著极差法(LSD)确定差异显著性水平。用Pearson系数法分析植物氮磷富集系数、植物生物量、土壤养分生态计量比等变量之间的相关性,聚类分析用于根据氮磷富集系数、累积吸收量和地上生物量划分植物类别,数据的统计分析用SPSS 21.0软件,使用Origin 8.1软件绘图。文中所示误差,如无说明,均为三个重复测定的标准误差($n=3$)。

2 结果与分析

2.1 消落带土壤养分特征

本文选取了有代表性的三峡水库消落带优势草本植物样点,对应的土壤养分含量差异显著(表1)。其中,涪陵珍溪河消落带的稗草样点的土壤SOC和TP含量最高,C/N最高,云阳汤溪河消落带的苍耳样点土壤SOC和TN含量最低,C/P和N/P最低,忠县香水河消落带的鬼针草样点土壤TN含量最高,C/N最低,忠县黄金河消落带的牛鞭草样点土壤TP含量最低,C/P最高,N/P最高。

2.2 消落带草本植物生物量和养分含量特征

三峡水库消落带植被调查结果表明,消落带植被主要为一年生和多年生草本植物,优势草本植物主要有苍耳(*Xanthium sibiricum* Patr. Widder)、籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris* L.)、鬼针草(*Bidens pilosa* L.)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、稗草[*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.]、空心莲子草[*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.]、青蒿(*Herba Acroptili Repentis*)、狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]、牛鞭草[*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf et C. E. Hubb]等。

消落带优势草本植物地上生物量以苍耳最大,铁线蕨地上生物量最低,消落带草本植物平均地上生物量为(529.89 ± 69.5) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。种间地上生物量差异显著(表2, $P<0.05$)。苍耳、青蒿和籽粒苋的地上生物量较高;狗牙根、水蓼和牛鞭草的生物量处于较低水平;稗草、鬼针草、铁线蕨和空心莲子草的地上部生物量最低(表2)。

不同种类植物的TC、TN和TP含量均差异显著($P<0.05$),苍耳的TC、TN和TP含量最大,籽粒苋TC含量最小,TC含量平均值为(435.21 ± 31.88) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;狗牙根TN含量最小,TN含量平均为(12.10 ± 5.41) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;牛鞭草TP含量最低,TP含量平均为(3.20 ± 0.61) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。植物种间C/N差异显著,平均值为43.47,狗牙根C/N最高,牛鞭草和鬼针草次之,籽粒苋、苍耳和青蒿C/N最低。而牛鞭草的C/P最高,远高于平均值185.83,苍耳的C/P最低。水蓼N/P最高,牛鞭草次之,狗牙根最低。

表 1 消落带植物样点对应的土壤碳氮磷含量

Tab.1 Nutrient content of soil in different sites correspond to dominant plants in WLFZ

代表性消落带	SOC/(mg · g ⁻¹)	TN/(mg · g ⁻¹)	TP/(mg · g ⁻¹)	C/N	C/P	N/P
涪陵盐旱溪	17.96 ± 1.53c	0.83 ± 0.22c	0.71 ± 0.06b	12.52	16.54	1.32
云阳磨刀溪	19.26 ± 3.93c	0.95 ± 0.11b	0.46 ± 0.08c	11.77	24.29	2.07
忠县香水河	19.13 ± 4.38c	1.25 ± 0.23a	0.59 ± 0.11b	8.87	18.81	2.12
涪陵珍溪河	25.76 ± 2.47a	1.15 ± 0.18a	0.91 ± 0.22a	12.99	16.42	1.26
云阳汤溪河	13.67 ± 2.10e	0.61 ± 0.12d	0.61 ± 0.18b	12.80	13.00	1.00
云阳澎溪河	16.28 ± 2.19d	0.73 ± 0.09cd	0.61 ± 0.10b	12.90	15.48	1.20
长寿区龙溪河	20.08 ± 3.83b	0.96 ± 0.25b	0.63 ± 0.12b	12.08	18.49	1.52
涪陵渠溪河	20.03 ± 2.48b	1.09 ± 0.15b	0.70 ± 0.16b	10.59	16.60	1.56
长寿区龙溪河	20.08 ± 3.83b	0.96 ± 0.25b	0.63 ± 0.12b	12.08	18.49	1.52
忠县黄金河	19.69 ± 1.95c	1.01 ± 0.27b	0.34 ± 0.04d	11.33	33.59	2.97

注:同一列中不同字母表示同一指标在不同植物种类间的差异显著($P < 0.05$)

表 2 消落带草本植物生物量和养分含量

Tab.2 Biomass and nutrient contents of herbaceous plant species in WLFZ

植物种类	生物量/(g · m ⁻²)	TOC/(mg · g ⁻¹)	TN/(mg · g ⁻¹)	TP/(mg · g ⁻¹)	C/N	C/P	N/P
空心莲子草	399.49 ± 43.68c	407.61 ± 10.20d	11.41 ± 0.11b	2.08 ± 0.1c	35.64	194.10	5.43
籽粒苋	639.15 ± 91.34b	366.33 ± 53.50e	15.71 ± 5.31a	3.11 ± 0.4b	25.34	118.16	5.06
鬼针草	408.75 ± 60.87c	443.32 ± 11.31a	8.50 ± 5.21c	1.90 ± 0.1c	52.69	233.32	4.47
稗草	406.48 ± 76.64c	445.51 ± 9.63a	12.21 ± 0.71b	3.51 ± 0.1b	36.41	127.29	3.49
苍耳	874.42 ± 90.38a	459.70 ± 21.82a	17.88 ± 4.92a	6.32 ± 0.08a	26.44	76.62	2.98
水蓼	466.15 ± 53.64c	432.92 ± 19.52c	14.02 ± 0.048b	1.71 ± 0.04c	33.96	254.65	8.24
狗牙根	483.26 ± 67.34c	452.00 ± 0.21a	5.11 ± 1.31e	4.01 ± 0.1b	91.21	113.00	1.28
铁线蕨	388.90 ± 72.54c	438.82 ± 13.20c	11.60 ± 5.01c	2.18 ± 0.07c	41.92	199.45	5.27
青蒿	792.77 ± 92.22a	455.31 ± 48.00a	17.80 ± 5.80a	4.09 ± 0.4b	28.00	111.05	4.34
牛鞭草	439.52 ± 46.37c	430.11 ± 2.61c	6.91 ± 0.87d	1.01 ± 0.01d	63.12	430.7	6.90

注:同一列中不同字母表示同一指标在不同植物种类间的差异显著($P < 0.05$)

2.3 消落带草本植物氮磷富集系数和累积吸收量

消落带优势草本植物对土壤中氮磷养分吸收能力的种间差异显著(图 2、图 3, $P < 0.05$)。植物对土壤氮的富集系数范围 5.75 ~ 22.21, 平均富集系数 13.82。其中,苍耳的氮富集系数最高,水蓼次之,分别为 22.21、20.38;空心莲子草、青蒿、籽粒苋的氮富集系数较高,分别为 18.20、17.93、16.94,均高于平均值。铁线蕨、稗草、鬼针草、牛鞭草和狗牙根的氮富集系数均低于平均值,分别为 11.34、9.79、9.21、6.41、5.75。消落带优势草本植物对磷的富集系数种间差异也很明显,范围 2.71 ~ 7.33,

平均富集系数为 4.65。其中,狗牙根对土壤磷的富集能力最强,青蒿、苍耳次之,富集系数分别为 7.33、6.70、6.10;稗草、籽粒苋对磷的富集能力较强,富集系数为 5.40、4.68;鬼针草、铁线蕨、牛鞭草、空心莲子草和水蓼对磷的富集能力较弱,低于平均水平。消落带优势草本植物氮磷富集系数均符合高富集植物的筛选标准(富集系数大于 1)^[32-33],整体上均具有较强的养分吸收能力。

消落带草本植物氮养分累积吸收量的种间差异较大,苍耳、青蒿和籽粒苋最高,分别为 15.65、14.11 和 10.03 g · m⁻²。牛鞭草和狗牙根最低,分

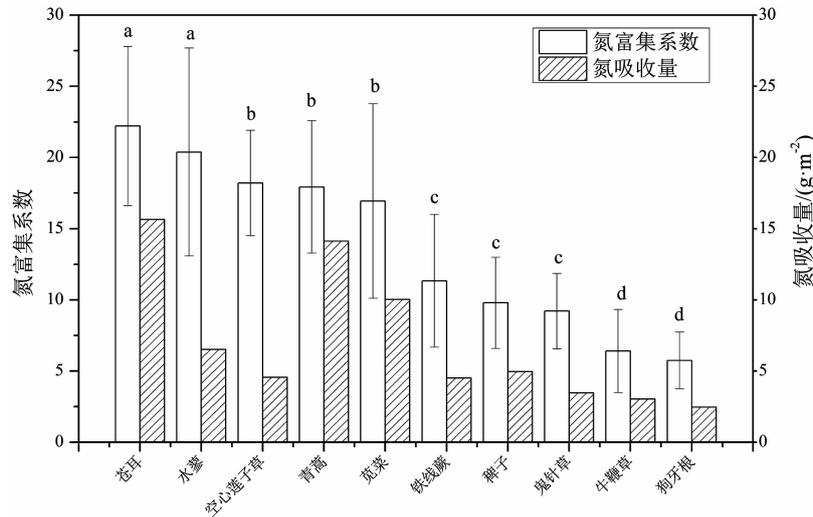


图2 消落带不同类型植物对土壤氮的富集系数和吸收量

Fig.2 Different plant species enrichment coefficients and accumulating ability of them to soil N in the WLFZ

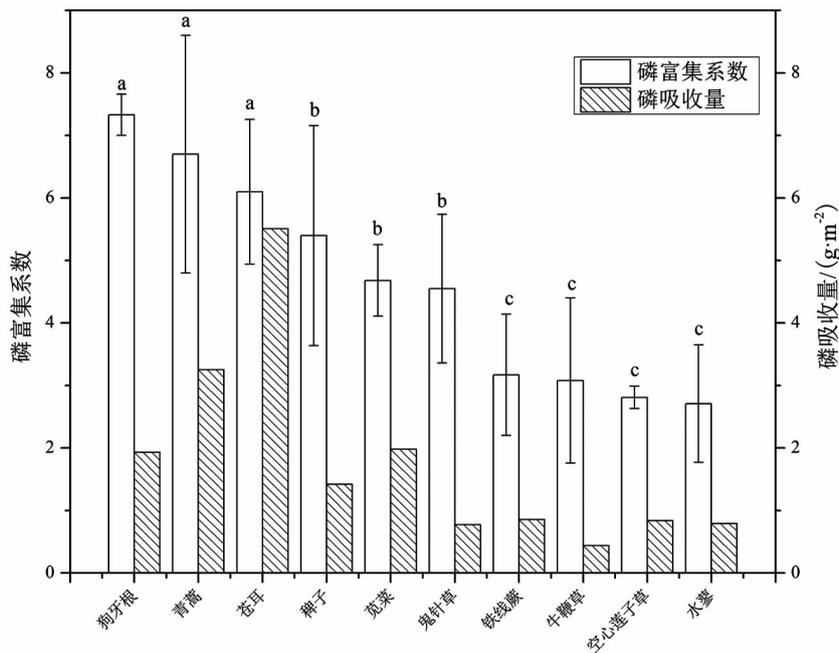


图3 消落带不同类型植物对土壤磷的富集系数和吸收量

Fig.3 Different plant species enrichment coefficients and accumulating ability of them to soil P in the WLFZ

别为 3.03 和 2.46 $g \cdot m^{-2}$, 平均氮累积吸收量为 6.93 $g \cdot m^{-2}$ 。苍耳和青蒿磷养分累积吸收量高于其他植物种, 分别为 5.51 和 3.25 $g \cdot m^{-2}$, 牛鞭草最低, 仅为 0.44 $g \cdot m^{-2}$, 优势草本植物平均磷累积吸收量为 1.77 $g \cdot m^{-2}$ 。

3 讨论

3.1 消落带植物的氮磷吸收富集能力

富集系数反映了植物对土壤养分的吸收固定能

力, 消落带不同植物对土壤氮磷养分的富集能力差异显著, 对土壤氮的富集系数整体上高于对磷的富集系数, 表明消落带草本植物对氮素的富集能力高于磷素。张永涛等^[34]对白洋淀不同年龄芦苇茎氮磷富集系数研究表明, 氮富集系数范围 4 ~ 14, 磷富集系数范围 0.5 ~ 3, 而消落带优势草本植物氮磷富集系数范围分别在 5.75 ~ 22.21, 2.71 ~ 7.33 之间, 平均值为 13.82、4.65, 整体上高于芦苇氮磷富集系数。

优势植物种间的生物量差异可能是落干后的陆

地环境对喜湿植物生长不利造成的。优势草本植物氮富集系数与其地上生物量无显著相关性 ($P > 0.05$), 磷富集系数与其地上生物量相关性显著 ($P < 0.05$), 可能是该区土壤氮供应不足^[36]使植物普遍处于缺氮状态, 植物种间对土壤氮的富集能力差异未体现在植物生长状态上。

植物养分累积吸收量由植物体内养分质量浓度和地上生物量共同决定。受生物量影响, 苍耳和青蒿氮、磷养分累积量均最高。不同物种在不同的环境条件下养分累积吸收量不同, 比较消落带草本植物和亚热带其他区域湿地植物的氮磷累积吸收量, 可分析消落带植物养分富集能力的强弱特征。赵原等^[37]研究了与三峡库区的气候与土壤类似的川中丘陵区沟渠 7 种草本植物的氮磷吸收能力, 植物地上部氮累积吸收量为 $2.88 \sim 15.66 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 美人蕉累积吸收量最高; 磷吸收量为 $0.48 \sim 2.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 美人蕉和水芋累积吸收量最大。部分结果与本文消落带草本植被的氮磷累积吸收量范围接近。李建娜等^[38]比较了湖南株洲人工湿地污水处理系统中 7 种植物对氮磷的吸收能力, 植物对氮累积吸收量范围 $21.40 \sim 48.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 磷累积吸收量范围 $1.68 \sim 7.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 高于消落带草本植物的氮磷累积吸收量。其原因在于, 污水氮磷浓度高, 不断有外源氮磷养分的补充。而三峡消落带在落干期无外源氮磷大量输入, 且经历反复淹水-落干后, 土壤氮磷含量下降^[3,4], 因而植物对氮磷累积吸收量较湿地污水处理系统而言受到限制。三峡消落带优势草本植物氮磷累积吸收量仍然可观。

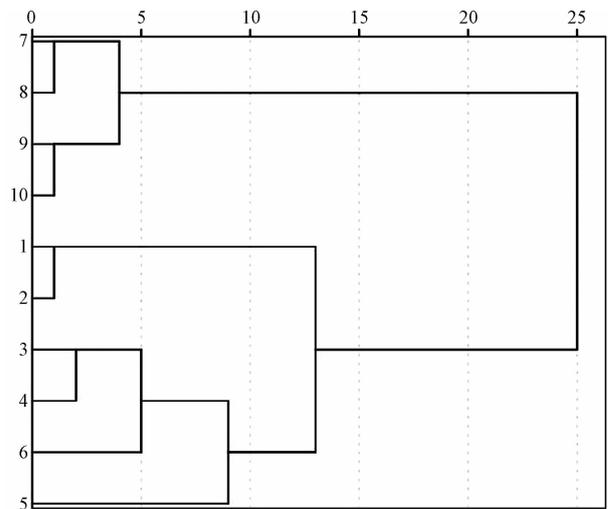
为了综合考虑消落带优势草本植物对土壤氮磷的吸收能力, 以氮磷富集系数、累积吸收量和地上生物量为变量进行聚类分析, 结果表明, 10 种优势草本植物可分为 5 类: 氮磷富集系数较高, 累积吸收量较大, 生物量较大, 具有较强的对土壤氮磷富集能力的植物种, 包括苍耳和青蒿, 为强氮磷富集型植物; 籽粒苋氮富集系数高、累积吸收量大, 磷富集系数中等、累积含量处于平均水平, 生物量大, 为氮富集型植物; 狗牙根磷富集系数最高、磷累积含量中等, 氮富集系数低、吸收量低, 生物量略低, 属磷富集型植物; 水蓼和空心莲子草氮富集系数高、氮吸收量中等, 磷富集系数最低、吸收量低, 生物量低, 弱氮富集型植物; 稗草、鬼针草、铁线蕨和牛鞭草氮磷富集系数低、累积含量低, 生物量也处于最低水平, 属弱氮

磷富集型植物(图 4)。

三峡水库消落带反季节水位调控, 使消落带春夏出露成陆, 此时降水丰沛, 温度条件适宜, 草本植物生长茂盛。强富集植物可有效固持土壤(底泥)氮磷养分, 拦蓄吸收库区营养盐, 在淹水前对其刈割回收, 可有效较少内源性氮磷污染负荷, 对减轻消落带水体富营养化有一定实际意义。从植物固持土壤养分的角度, 三峡水库植被恢复物种可从苍耳、青蒿、籽粒苋和狗牙根中选取。

3.2 消落带草本植物养分的生态计量特征

植被生产力受生长环境中关键养分如氮磷供应量的限制^[42], 植物体内的 C/N 和 C/P 可反映单位养分供应量可达到的生产力^[43,44]。N/P 则可表征植物氮磷养分限制格局, Koerselman 和 Meuleman 研究认为, 植物 N/P 可以作为判别养分限制的工具, N/P 大于 16, 受磷限制, N/P 小于 14, 受氮限制; N/P 介于 14 与 16 之间, 受氮磷共同限制^[45]。本研究中的优势草本植物茎叶 TN 和 TP 平均值分别为 $12.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, TN 低于中国陆地 753 植物叶片氮含量的平均值 $18.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, TP 高于磷含量的平均值 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[46], N/P 均小于 14, 属氮限制型, 与米玮洁等研究结论相似^[47](表 2), 可能是消落带反复淹水-落干后消落带土壤氮



图中数字分别代表以下植物: 1 - 苍耳, 2 - 青蒿, 3 - 籽粒苋, 4 - 水蓼, 5 - 狗牙根, 6 - 空心莲子草, 7 - 稗草, 8 - 鬼针草, 9 - 铁线蕨, 10 - 牛鞭草

图 4 消落带不同类型植物氮磷富集能力分类树状图

Fig. 4 Dendrogram of nitrogen and phosphorus's Enrichment capacity of different plant species in the WLFZ

养分下降较磷更显著所致^[36]。

植物养分生态计量特征反映了植物对生长环境的长期适应^[45],植物在不同的环境条件下,有不同的生长策略,调整自身养分需求以适应环境的改变。研究表明,低氮含量植物更适合在氮限制环境中生长^[46]。本实验中,优势草本植物的 TN 含量均较低,反映了植物对低氮环境的适应,自发降低氮吸收以减轻土壤氮限制作用。但氮富集系数较高的苍耳和青蒿长势最好,说明氮富集能力强的植物种在氮限制环境中更具有竞争力。

苍耳和青蒿 TP 含量在优势草本植物中最高, C/P 处于最低水平, N/P 低于平均值;苍耳和青蒿生物量位列靠前,长势最好,基本符合植物生长速率随植物磷含量增加而提升、随 C/P、N/P 增加而减小的生长速率假说^[47]。氮限制型草本植物的生长速率与 C/N 呈负相关关系^[27],本实验中,苍耳和青蒿氮含量最高, C/N 在 10 种植物中处于最低水平。因此,苍耳和青蒿的高土壤氮、磷富集吸收能力,可能是其较低的生态计量比及其对应的较高的生长速率带来的。其他优势草本植物基本也符合此特征,较高的 C/N、C/P、N/P 对应较低的生长速率和地上生物量,导致较低的对土壤氮、磷吸收能力。

土壤 C/P 与植物 C/P 显著相关($P < 0.05$),植物 C/P 随土壤 C/P 的增加而上升,二者正相关性显著,说明植物磷素与土壤磷耦合关系较好,土壤中可供植物吸收利用的磷含量较充足,这也与该区紫色土的磷含量较高相符^[48]。土壤 C/N 与植物 C/N,及土壤 N/P 与植物 N/P 无显著相关性($P > 0.05$)。主要因消落带土壤氮(尤其是可为植物吸收的有效氮)供应不足,影响植物氮吸收,土壤氮与植物氮含量耦合性较差,同时也印证了前述三峡水库消落带草本植物均为氮限制型植物的结果。

4 结论

(1)三峡水库腹心段消落带优势草本植物主要有苍耳、籽粒苋、铁线蕨、鬼针草、水蓼、稗草、空心莲子草、青蒿、狗牙根、牛鞭草等。

(2)三峡消落带优势草本植物对土壤氮和磷的吸收富集能力均处于较高水平,且差异显著。上述 10 种草本植物可分为 5 类:强氮磷富集型植物(苍耳、青蒿);氮富集型植物(籽粒苋);磷富集型植物

(狗牙根);弱氮富集型植物(水蓼和空心莲子草);弱氮磷富集型植物(稗草、鬼针草、铁线蕨和牛鞭草)。消落带草本植物的生态化学计量比可通过影响植物生长速率进而影响植物对土壤氮磷的富集能力。

(3)强富集型和富集型植物具有更强的光合吸收提取效率,对氮磷养分生态拦截能力强,因此,可选择苍耳、青蒿、籽粒苋和狗牙根作为三峡库区消落带的植被恢复物种。

参考文献(References)

- [1] WANTZEN K M, ROTHHAUPT K O, MORTL M, et al. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **613**(1): 1-4.
- [2] YUAN X Z, ZHANG Y W, LIU H, et al. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities [J]. *Environment Science & Pollution Research International*, 2013, **20**(10): 7092-7102.
- [3] 沈雅飞,王娜,刘泽彬,等.三峡水库消落带土壤化学性质变化[J].水土保持学报,2016,**30**(3):190-195. [SHEN Yafei, WANG Na, LIU Zebin, et al. Changes of the soil chemical properties in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(3): 190-195]
- [4] 程瑞梅,刘泽彬,肖文发,等.三峡水库典型消落带土壤化学性质变化[J].林业科学,2017,**53**(2):19-25. [CHENG Ruimei, LIU Zebin, XIAO Wenfa, et al. Changes of soil chemical properties in typical hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, **53**(2):19-25]
- [5] 肖丽微.三峡水库消落带土壤-植物系统淹水浸泡的养分释放特征[D].北京:中国科学院大学,2017:12-13. [XIAO Liwei. Characteristics of nutrient release under inundation from soil and plants in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017:12-13]
- [6] 谭淑端,王勇,张全发.三峡水库消落带生态环境问题及综合防治[J].长江流域资源与环境,2008,**17**(01):101-105. [TAN Shuduan, WANG Yong, ZHANG Quanfa. Environmental challenges and countermeasures of the water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(01): 101-105]
- [7] 张金洋,王定勇,石孝洪.三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究[J].水土保持学报,2004,**18**(06):120-123. [ZHANG Jinyang, WANG Dingyong, SHI Xiaohong. Change of soil character after flooding in drawdown area of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, **18**(6):120-123]
- [8] 吕发友,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库消落带淹水——落干交替下紫色土力学特性变化模拟[J].水土保持学报,2017,**31**

- (3): 79 – 84. [LYU Fayou, BAO Yuhai, HE Xiubin, et al. Simulation of the changes in purple soil mechanical properties in response to alternate submergence and exposure in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2017, **31**(3): 79 – 84]
- [9] 胥焘, 王飞, 郭强, 等. 三峡水库香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1502 – 1508. [XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, et al. Transfer characteristic and source identification of soil heavy metals from water-level-fluctuating zone along Xiangxi River, Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1502 – 1508]
- [10] GAO B, GAO L, XU D, et al. Assessment of Cr pollution in tributary sediment cores in the Three Gorges Reservoir combining geochemical baseline and in situ DGT [J]. *Science of Total Environment*, 2018, 628 – 629: 241 – 248.
- [11] CHEN Y, LI S, ZHANG Y, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1): 366 – 372.
- [12] ZHANG B, GUO J S, FANG F, et al. Concentration of nutrients in the soil in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2012, **12**(2): 105 – 114.
- [13] ZHANG B, FANG F, GUO J, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**(3): 153 – 159.
- [14] YE C, CHENG X, ZHANG Q. Recovery approach affects soil quality in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China: implications for revegetation[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2014, **21**(3): 2018 – 2031.
- [15] XIAO L W, ZHU B, NSENGA K M, et al. Plant soaking decomposition as well as nitrogen and phosphorous release in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of Total Environment*, 2017, **592**: 527 – 534.
- [16] 谭秋霞, 朱波, 花可可. 三峡水库消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3043 – 3048. [TAN Qiuxia, ZHU Bo, HUA Keke. Characteristics of dissolved organic carbon release under inundation from typical grass plants in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3043 – 3048]
- [17] 王建超, 朱波, 汪涛, 等. 三峡水库典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1144 – 1151. [WANG Jianchao, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Nitrogen and phosphorus release from herbaceous vegetation under simulated inundation experiment of water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1144 – 1151]
- [18] TANG X Q, MIN W U, JIN F. Vegetation restoration and reconstruction in the water level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, **29**(3): 13 – 17.
- [19] 杜立刚, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡水库城市消落带生态规划与保护探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(6): 726 – 731. [DU Ligang, FANG Fang, GUO Jinsong, et al. Ecological planning and protection of urban water-level-fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(6): 726 – 731]
- [20] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 等. 三峡水库消落带植被重建[J]. *植物学报*, 2005, **22**(5): 513 – 522. [WANG Yong, LIU Yifei, LIU Songbai, et al. Vegetation reconstruction in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, **22**(5): 513 – 522]
- [21] 马利民, 唐燕萍, 张明, 等. 三峡水库消落区几种两栖植物的适生性评价[J]. *生态学报*, 2009, **29**(4): 1885 – 1892. [MA Liming, TANG Yanping, ZHANG Ming, et al. Evaluation of adaptability of plants in water-fluctuation-zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 1885 – 1892]
- [22] XIAO G L, LI T X, ZHANG X Z, et al. Uptake and accumulation of phosphorus by dominant plant species growing in a phosphorus mining area [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **171**(2009): 542 – 550.
- [23] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243 – 266.
- [24] BAZZAZ F A. Allocation of resources in plants: state of the science and critical questions [J]. *Plant Resource Allocation*, 1997: 1 – 37.
- [25] PALO F D, FORNARA D. Soil fertility and the carbon:nutrient stoichiometry of herbaceous plant species[J]. *Ecosphere*, 2015, **6**(12): 1 – 15.
- [26] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 2 – 6. [HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 2 – 6]
- [27] YU Q, WU H, HE N, et al. Testing the growth rate hypothesis in vascular plants with above- and below-ground biomass [J]. *Plos One*, 2012, **7**(3): 1 – 9.
- [28] 蒙古军, 申文明, 吴秀芹. 基于RS/GIS的三峡水库景观生态综合评价[J]. *北京大学学报*, 2005, **41**(2): 295 – 302. [MENG Jijun, SHEN Wenming, WU Xiuqin. Integrated landscape ecology evaluation based on RS/GIS of Three-Gorge Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, **41**(2): 295 – 302]

- [29] LEE A A, BUKAVECKAS P A. Surface water nutrient concentrations and litter decomposition rates in wetlands impacted by agriculture and mining activities[J]. *Aquatic Botany*, 2002, **74**(4): 273 – 285.
- [30] 王建超, 朱波, 汪涛. 三峡库区典型消落带淹水后草本植被的自然恢复特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(5): 603 – 610. [WANG Jianchao, ZHU Bo, WANG Tao. Characteristics of restoration of natural herbaceous vegetation of typical water-level fluctuation zone after flooding in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(5): 603 – 610]
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 228 – 233. [LU Rukun. Analysis methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 228 – 233]
- [32] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, **13**(5): 468 – 474.
- [33] KUMWIMBA M N, ZHU B, SUANON F, et al. Long-term impact of primary domestic sewage on metal/loid accumulation in drainage Ditch sediments, plants and water: Implications for phytoremediation and restoration [J]. *Science of Total Environment*, 2017, 81 – 582: 773 – 781.
- [34] BAKER A J M, BROOKS R R, PEASE A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. *Plant & Soil*, 1983, **73**(3): 377 – 385.
- [35] 张永涛, 崔保山, 蓝艳, 等. 白洋淀不同年龄芦苇根状茎中氮和磷含量[J]. *湿地科学*, 2013, **11**(2): 286 – 291. [ZHANG Yongtao, CUI Baoshan, LAN Yan, et al. Nitrogen and phosphorous contents in phragmites australis Rhizomes at different ages in Baiyangdian Lake[J]. *Wetland Science*, 2013, **11**(2): 286 – 291]
- [36] 郭泉水, 康义, 赵玉娟, 等. 三峡水库消落带土壤氮磷钾、pH值和有机质变化[J]. *林业科学*, 2012, **48**(3): 7 – 10. [GUO Quanshui, KANG Yi, ZHAO Yujuan, et al. Changes in the contents of N, P, K, pH and organic matter of the soil which experienced the Hydro-Fluctuation in the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(3): 7 – 10]
- [37] 赵原, 王彦, 汪涛, 等. 川中丘陵区高富集氮、磷沟渠植物的筛选[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(10): 12 – 16. [ZHAO Yuan, WANG Yan, WANG Tao, et al. Screening for high nitrogen and phosphorus enrichment ditch plants in the Hilly Area of Central Sichuan Basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, **37**(10): 12 – 16]
- [38] 李建娜, 胡曰利, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, **29**(7): 506 – 509. [LI Jianna, HU Yueli, WU Xiaofu, et al. Nitrogen and phosphorus removal capacity of plants species in constructed wetlands for treating municipal wastewater [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, **29**(7): 506 – 509]
- [39] HOGAN E J, MINNULLINA G, SMITH R I, et al. Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen: phosphorus relationships in *Cladonia portentosa* [J]. *New Phytologist*, 2010, **186**(4): 911 – 925.
- [40] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. *Science*, 2004, **305**(5683): 509 – 513.
- [41] HE J S, WANG L, FLYNN D F, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, **155**(2): 301 – 310.
- [42] KOERSELMAN W. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1441 – 1450.
- [43] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf Nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377 – 385.
- [44] 米玮洁, 邹怡, 李明, 等. 三峡水库消落区典型草本植物氮、磷养分计量特征[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(4): 802 – 811. [MI Weijie, ZOU Yi, LI Ming, et al. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of typical herb plants in the water level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Lake Science*, 2016, **28**(4): 802 – 811]
- [45] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2010, **3**(6): 540 – 550.
- [46] TILMAN D. Resource competition and community structure[M]. Princeton: Princeton University Press, 1982: 139 – 177.
- [47] HENDRICKS J J, ABER J D, NADELHOFFER K J, et al. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(1): 57 – 69.
- [48] 李仲明. 中国紫色土[M]. 成都: 科学出版社, 1991: 325 – 327. [LI Zhongming. Purple soil in China [M]. Chengdu: Science Press, 1991: 325 – 327]

Nitrogen and Phosphorus Absorption from Soil by the Dominant Herbaceous Species in the Water-Level-Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir

WANG Zheng^{1,2,3}, XIAO Liwei^{1,2,3}, TAN Qiuxia^{1,2,3}, TIAN Linlin^{1,2,3}, ZHU Bo^{1,2*}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

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

Abstract: Grass grew vigorously and might retain large amount of nutrients during spring and summer in the exposed bottom of water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR). Research on plants species' absorption capacity and their interspecific differences of soil nitrogen (N) and phosphorus (P) would provide important preliminary data for screening and rebuilding vegetation with high efficiency of pollutant interception in the TGR. In this study, ten dominant herbaceous plant species were collected for analysis of nutrients enrichment coefficient (EC) and absorption efficiencies. Influence factors of different absorption capacity among the species were analyzed by ecological stoichiometry methods. Results showed that, the dominant herbaceous plants were *Xanthium sibiricum* Patrin Widder, *Herba Acroptili Repentis*, *Amaranthus tricolor* L., *Cynodon dactylon* (L.) Pers., *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv., *Bidens pilosa* L., *Adiantum capillus-veneris* L. and *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapfet C. E. Hubb in the WLFZ of the TGR. Aboveground biomass showed a significant difference among plants species while *Xanthium sibiricum* Patrin Widder's biomass was higher than other species. Moreover, there were significant differences of nutrients absorption ability among those dominant herbaceous plant species in the WLFZ. *Xanthium sibiricum* Patrin Widder was the specie with highest nitrogen EC, highest nitrogen and phosphorus cumulative uptake quantities. While *Cynodon dactylon* (L.) Pers got the highest phosphorus EC. The ten dominant plants were classified into five types by plants' enrichment coefficient, cumulative uptake quantities and above-ground biomass. *Xanthium sibiricum* Patrin Widder and *Herba Acroptili Repentis* were classified into a strong nitrogen and phosphorus enrichment group; *Amaranthus hypochondriacus* L. was in strong nitrogen enrichment group; *Cynodon dactylon* (L.) Pers. belonged to high phosphorus enrichment type; *Polygonum hydropiper*, *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. fell a relatively weak nitrogen enrichment type; *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv., *Bidens pilosa* L., *Adiantum capillus-veneris* L. and *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapfet C. E. Hubb were attached to low nitrogen and phosphorus enrichment group. Regarding to nutrients uptake capacity, *Xanthium sibiricum* Patrin Widder, *Herba Acroptili Repentis*, *Amaranthus hypochondriacus* L. and *Cynodon dactylon* (L.) Pers. might be recommended as species for the ecological restoration in the WLFZ due to their higher phytoextraction efficiency.

Key words: Three Gorges Reservoir; water-level-fluctuation zone; herbaceous plants; nitrogen and phosphorus; absorption capacity; ecological stoichiometry