

DOI: 10.5846/stxb201812032635

王晓锋, 刘婷婷, 龚小杰, 袁兴中, 刘欢, 孔维苇. 三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征. 生态学报, 2020, 40(4): 1342-1356.

Wang X F, Liu T T, Gong X J, Yuan X Z, Liu H, Kong W W. Phosphorus forms in rhizosphere soils of four typical plants in the Littoral Zone of the Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1342-1356.

## 三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征

王晓锋<sup>1,2</sup>, 刘婷婷<sup>1,2</sup>, 龚小杰<sup>1,2</sup>, 袁兴中<sup>1,2,3,\*</sup>, 刘欢<sup>1,2</sup>, 孔维苇<sup>1,2</sup>

1 长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 401331

2 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

3 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400030

**摘要:** 三峡库区消落带生态系统演变对水库安全具有重要影响, 其中植物群落演变与土壤氮磷形态转化及释放等广受关注。然而, 消落带植物根际效应与土壤磷形态关系及潜在影响并不清楚。选择三峡库区澎溪河消落带为研究对象, 分别在冲积潮土、紫色土和水稻土分布的消落区采集典型草本植物(狗牙根、香附子、苍耳)和农作物(玉米)根际、非根际土壤, 分析无机磷和有机磷的形态特征, 探讨了消落带典型植物生长对土壤磷形态的根际效应及潜在影响。结果表明, 土壤类型对土壤磷含量及磷赋存形态具有显著影响, 紫色土磷含量最高, 且活性磷含量低于冲积潮土和水稻土, 表现出磷库稳定性较高; 4种植物根际土壤全磷、有效磷及不同形态无机、有机磷(弱吸附态磷 WA-P、潜在活性磷 PA-P、铁铝结合态磷 Fe/Al-P、钙结合态磷 Ca-P、残渣态磷 R-P)含量均高于非根际, 表现出明显的根际富集效应; 不同植物根际土壤全磷和有效磷表现为狗牙根>苍耳>香附子>玉米, 但磷形态在不同植物根际富集水平不同: 活性较高的 WA-P、PA-P 含量在玉米和苍耳覆盖区均高于狗牙根和香附子, 而较稳定 Ca-P<sub>i</sub>、R-P<sub>i</sub>、Fe/Al-P<sub>o</sub>、Ca-P<sub>o</sub> 含量在狗牙根和香附子覆盖区更高, 表明玉米和苍耳生长有利于稳定性磷的活化, 提高消落带土壤磷流失风险。不同植物根际对不同形态磷富集率差异明显, 且玉米根际对活性磷形态的富集率最高, 表明农业活动可能加速土壤稳定性磷的活化。pH、土壤有机质、土壤容重与无机磷的赋存形态关系密切, 而有机磷赋存形态受 pH 影响显著, 植物根际有机质积累和有机酸分泌等是影响土壤磷形态变化的主要因素。消落带植物群落演变及恢复对土壤磷形态转化具有重要影响。

**关键词:** 三峡库区消落带; 典型植物; 根际效应; 磷形态; 富集率

## Phosphorus forms in rhizosphere soils of four typical plants in the Littoral Zone of the Three Gorges Reservoir

WANG Xiaofeng<sup>1,2</sup>, LIU Tingting<sup>1,2</sup>, GONG Xiaojie<sup>1,2</sup>, YUAN Xingzhong<sup>1,2,3,\*</sup>, LIU Huan<sup>1,2</sup>, KONG Weiwei<sup>1,2</sup>

1 Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research of the Upper Yangtze River, Chongqing 401331, China

2 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

3 School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China

**Abstract:** Three gorges reservoir (TGR), the largest water conservancy project ever built in the world, with about 348.93 km<sup>2</sup> of littoral zone produced due to the water level control, attracted more and more attention for its fragile environment. The variation of plant community and nutrient-release of the soil in the littoral zone, which were caused by long-term winter flooding and summer drought, are of great concerns for the ecological security of the TGR. However, little is known about the relationship between plant community and the combined forms of the soil nutrients. In this study, Pengxi river, an typical tributary of the TGR, with the largest area for littoral zone, were selected to perform an investigation on the phosphorus forms of the rhizosphere and non-rhizosphere soils of four typical plants (contained *Cynodon dactylon* L.,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41807321); 重庆师范大学博士科研启动项目(17XLB023); 重庆师范大学人才引进项目(17XRC003); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0672)

**收稿日期:** 2018-12-03; **网络出版日期:** 2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1072000659@qq.com

*Cyperus rotundus* L., *Anthium sibiricum* Patr. ex Widder, and *Zea mays* L.) from three transects with different soil types (Paddy soil, Purple soil, and Fluvo-aquic soils). The variables measured included total phosphorus (TP), available P (AP), inorganic phosphorus (IP), organic phosphorus (OP), and different forms of IP and OP (i.e. weakly adsorbed phosphorus WA-P, potential active phosphorus PA-P, Fe/Al-bound phosphorus Fe/Al-P, Calcium bonded phosphorus Ca-P and Residue phosphorus Re-P). The results showed that soil type was a crucial factor of determining nutritional status and species of phosphorus, while vegetation cover was an additional factor. 1) Compared with all non-rhizosphere soil, concentrations of TP, AP, IP, OP, and different phosphorus forms were obviously enriched in rhizosphere soil of different plants in three soil types as the result of the root absorption and activation. The TP, AP, IP and OP concentrations showed *C. dactylon* > *A. sibiricum* > *C. rotundus* > *Z. mays*. Enrichment rate of the IP showed the highest in the rhizosphere of *C. dactylon* and the lowest in *Z. mays*. 2) WA-P<sub>i</sub>, PA-P<sub>i</sub> and Fe/Al-P<sub>i</sub> (representing some labile phosphorus) in rhizosphere of *A. sibiricum* and *Z. mays* were higher than those in the rhizosphere of *C. rotundus* and *C. dactylon*. The Ca-P<sub>i</sub> and R-P<sub>i</sub>, which are mainly stabilized phosphorus, were much lower in rhizosphere of *A. sibiricum* and *Z. mays* than those in *C. rotundus* and *C. dactylon*. Those indicated that the rhizosphere effect of different plants on the IP cycle was significant differences. The activation of stabilized phosphorus for the rhizosphere effect of *A. sibiricum* and *Z. mays* were much more obvious than that of *C. rotundus* and *C. dactylon*. 3) WA-P<sub>o</sub>, PA-P<sub>o</sub>, Fe/Al-P<sub>o</sub>, Ca-P<sub>o</sub>, R-P<sub>o</sub> (different OP forms) were also showed a similar law with IP forms. WA-P<sub>o</sub> and PA-P<sub>o</sub> in the rhizosphere of *C. rotundus* and *C. dactylon* were much lower than those in rhizosphere of *A. sibiricum* and *Z. mays*, while Fe/Al-P<sub>o</sub> were lower in rhizosphere of *A. sibiricum* and *Z. mays*. Higher enrichment effect of WA-P<sub>o</sub> and PA-P<sub>o</sub> under *Z. mays* zone showed the higher activation efficiency of phosphorus in rhizosphere of *Z. mays*. 4) pH, organic matter and volume-weight was significantly correlated with the IP forms, while only pH related with OP forms. Our research could provide some indirect evidences that *C. rotundus* and *C. dactylon* was better than *A. sibiricum* and *Z. mays* to improve soil P holding and fixation. The vegetation recovery in the drawdown zone should consider the rhizosphere effect of different plants on N cycle.

**Key Words:** littoral zone of three gorges reservoir; typical plants; rhizosphere effect; phosphorus forms; enrichment ratio

三峡水库是世界上最大的人工水库,由于采用“蓄清排浑”的运行方案,库区周边形成了垂直高差达30m,总面积438 km<sup>2</sup>的反季节消落带<sup>[1]</sup>。特殊的水位波动和后靠移民活动干扰,使得三峡库区消落带生态系统要素,包括植物群落结构<sup>[2-5]</sup>、土壤<sup>[6-11]</sup>、微生物群落<sup>[12-13]</sup>、生物地化过程<sup>[14-15]</sup>等,均发生明显改变,其中植物群落改变与土壤氮磷流失成为生态学和环境科学研究的热点<sup>[6-8, 16]</sup>。研究表明,随着淹水时间延长,三峡库区消落带植物群落也不断改变,从最初的苍耳、狗牙根大量分布逐渐转变为狗牙根、香附子为主,进一步形成了以狗牙根、苍耳、香附子、鬼针草、草木犀等为优势种的植物组成<sup>[2-4, 17]</sup>。同时,植物群落的演变导致养分吸收、凋落物输入和根际效应等差异,必然影响土壤碳、氮、磷积累和消耗过程<sup>[18-20]</sup>,进而对消落带土壤氮磷流失产生潜在影响。研究表明,消落带不同植物覆盖对土壤理化性质及氮形态产生显著影响<sup>[21]</sup>,不同植物根际效应可能增加消落带土壤氮流失风险<sup>[10]</sup>。对于消落带这一特殊生态条件,研究植物群落差异与土壤氮磷特征的关系,对认识消落带土壤氮磷流失机理和生态治理具有重要意义。

磷是水体富营养化的重要限制,消落带土壤在夏季低水位运行期间,拦截地表径流中的磷,冬季淹水后与上覆水之间进行磷交换,参与水体磷循环,成为三峡库区水环境安全的重要威胁<sup>[7, 9]</sup>。已有研究对消落带土壤磷空间分布<sup>[7]</sup>、磷的吸附释放特征<sup>[7, 9]</sup>以及磷的赋存形态<sup>[22-24]</sup>等开展了研究,并认为干湿交替状态能够增加土壤磷向水体的释放风险<sup>[23]</sup>,而且土壤磷形态是决定淹水环境中磷释放、吸附和生物有效性等的重要因素<sup>[25, 26]</sup>。土壤中磷形态通常可分为有机磷和无机磷,又根据不同的提取过程分为弱吸附态磷、潜在活性磷、铁铝结合态磷、钙结合态磷以及残渣态磷,各形态磷对界面交换的贡献各不相同<sup>[27]</sup>。黄俊杰等<sup>[24]</sup>对消落带土壤磷形态研究均表明,干湿交替过程对土壤磷形态组成有明显改变,活性磷占比低于岸边土壤,冬季淹释

放是主要原因。目前对消落带土壤磷形态研究更多关注淹水深度、淹水时间、土壤类型等影响及其释放风险<sup>[23-26]</sup>,对植物覆盖及其根际效应的影响研究尚属空白。大量的研究表明,植物根际能够分泌有机酸、磷酸酶等直接加速土壤磷的活化<sup>[19, 28, 29]</sup>,同时提高磷转化微生物活性间接改变磷的代谢过程<sup>[28]</sup>,加之不同植物对磷的吸收效率的差异,可能成为影响消落带土壤磷释放风险的重要因素。在三峡水库水环境安全和消落带生态系统耦合演变的背景下,消落带土壤磷赋存形态及影响因素研究至关重要。从植物类型及其根际效应出发研究土壤磷赋存形态,对阐明反季节干湿交替和植物群落演变双重作用下消落带土壤磷循环过程具有一定科学意义。

目前关于三峡植物、土壤等研究较多,但对消落带典型植物根际土壤特征的研究较少<sup>[21]</sup>,尤其植物根际效应与磷赋存形态研究相对滞后,限制了对消落带植物-土壤-水复合系统的磷循环充分认识。本文为初步探究植物根际效应与土壤磷形态关系,选择三峡库区澎溪河流域 3 种土壤类型分布区,分别采集 3 种典型草本植物和 1 种农作物根际土壤和非根际土壤,采用 Hedley 法分析不同土壤类型下 4 种植物根际与非根际土壤磷赋存形态,探讨了植物根际对不同形态磷的富集特征,通过比较不同植物根际效应对土壤磷形态的影响特点,为三峡水库消落带植被恢复和生态修复研究提供科学参考,也为消落带磷循环研究提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究采样区域位于三峡库区一级支流澎溪河流域(30°49'—31°41' N, 107°56'—108°54' E)。澎溪河位于三峡库区中部,发源于重庆市开州区雪宝山,流经开州区、云阳县,在云阳县双江镇注入长江,全长 182.4 km,流域面积 5172.5 km<sup>2</sup>,河道平均坡降 0.125%,由于三峡水位调节在流域内形成了长度 67.33 km,总面积为 56.6 km<sup>2</sup>的消落带,占三峡水库消落区面积的 16.3%<sup>[1]</sup>,属三峡库区消落带面积最大的支流。

澎溪河流域地处四川盆地东部低山丘陵区,属亚热带季风气候区,气候温和湿润,多年平均气温 18.6℃,多年平均降水量 1100—1500 mm,多年平均径流量 35.8 亿 m<sup>3</sup>。澎溪河消落带土壤类型众多,上游以冲积潮土为主,中游有水稻土、紫色土,下游分布少量黄壤。由于消落带面积较大,平缓消落区较多,在开州、云阳境内部分缓坡消落区夏季露出后被当地农民垦荒耕种。近年来,澎溪河水环境安全问题明显,水华频发,影响三峡水库生态安全。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 采样设计

三峡水位每年 9 月底开始蓄水,10 月中旬蓄水至 175 m,高水位运行至 12 月,随后缓慢放水,至次年 5 月底降至 145 m,迎接汛期。本研究于 2014 年 6 月 11—14 日,三峡水库低水位运行且消落带植物生长旺盛季节开展植物群落调查和土壤样品采集。

本研究设置 3 个因素,土壤类型、植物类型、根际与非根际进行交互试验设计。其中,选择澎溪河流域云阳高阳镇、云阳养鹿镇、开州区渠口镇 3 个土壤类型不同的区域设置采样断面(表 1),分别选取狗牙根(*Cynodon dactylon* L.)、香附子(*Cyperus rotundus* L.)、苍耳(*Anthium sibiricum* Patr. ex Widder)这 3 种典型的消落带草本植物群落和人工种植玉米(*Zea mays* L.)为研究对象,同时采集 4 种植物的根际土和非根际土,共 24 个处理。为减少高程和地形干扰,所选植物群落尽可能位于相似高程和坡度,各采样点的生境信息如表 1 所示。

狗牙根是消落带分布最广泛的植物种类,是一种抗逆性和繁殖力极强的多年生禾本科草本植物,在消落带形成初期已经形成大面积的优势种群<sup>[2]</sup>。苍耳为菊科苍耳属,一年生草本,三峡蓄水初期形成优势种群,但随着 175 m 蓄水后,种群分布向上移动(160—165 m),一部分被其他植物群落替代<sup>[3]</sup>。香附子属莎草科多年生草本植物,在缓坡消落区呈片状分布,是三峡水库 175 m 水位运行以来在 150—160 m 之间形成的替代群落之一<sup>[2-4]</sup>,在澎溪河消落带分布较多。为了对照耕作对消落带土壤磷流失的影响,本研究在 3 种自然草本

周围选取当地垦荒种植的玉米地进行采样分析。3 个采样区玉米均在 5 月中旬播种,采样时均处于拔节期,玉米地未经人工施肥处理。

表 1 各植物类型采样点环境特征及植物生长状况

Table 1 Sampling sites features and biomass of the four plant species (mean±SD, n = 10)

| 土壤类型<br>Soil type | 植物类型<br>Plant type        | 坡度<br>Gradient/(°) | 高程<br>Elevation/m | 盖度<br>Coverage/% | 平均高度<br>Height/cm | 地上部干重<br>Dry weight/<br>(g/株) | 主根长<br>Root<br>length/cm | 单株须根数<br>Whiskers<br>counts/<br>(n/株) |
|-------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 冲积潮土              | 狗牙根(G) <i>C. dactylon</i> | 21                 | 165               | 95.0             | 48.7              | 24.6                          | 17.1                     | 10.5                                  |
| Fluvaquent        | 香附子(X) <i>C. rotundus</i> | 27                 | 164               | 97.7             | 28.0              | 14.5                          | 17.6                     | 5.70                                  |
|                   | 苍耳(C) <i>A. sibiricum</i> | 22                 | 163               | 91.7             | 108.3             | 218.6                         | 40.6                     | 30.6                                  |
|                   | 玉米(Y) <i>Z. mays</i>      | 18                 | 165               | 72.0             | 167               | 151.3                         | 31.0                     | 16.9                                  |
| 紫色土               | 狗牙根(G) <i>C. dactylon</i> | 30                 | 167               | 96.7             | 57.3              | 19.3                          | 17.8                     | 11.0                                  |
| Purple soil       | 香附子(X) <i>C. rotundus</i> | 29                 | 165               | 093.0            | 44.3              | 13.8                          | 16.0                     | 6.50                                  |
|                   | 苍耳(C) <i>A. sibiricum</i> | 26                 | 166               | 88.0             | 113.7             | 205.1                         | 41.6                     | 24.7                                  |
|                   | 玉米(Y) <i>Z. mays</i>      | 20                 | 165               | 76.3             | 176.7             | 208.7                         | 29.1                     | 26.5                                  |
| 水稻土               | 狗牙根(G) <i>C. dactylon</i> | 17                 | 158               | 95.7             | 40.0              | 16.6                          | 15.2                     | 8.10                                  |
| Paddy soil        | 香附子(X) <i>C. rotundus</i> | 19                 | 161               | 95.0             | 28.3              | 11.6                          | 16.1                     | 5.80                                  |
|                   | 苍耳(C) <i>A. sibiricum</i> | 25                 | 166               | 87.7             | 91.7              | 177.7                         | 35.6                     | 20.1                                  |
|                   | 玉米(Y) <i>Z. mays</i>      | 14                 | 168               | 73.0             | 145.3             | 167.5                         | 26.3                     | 20.3                                  |

### 1.2.2 样品采集

在 3 个研究区选取 4 种植物群落生长集中的位置,设置 3—5 个面积为 1m×1m 的样方,每个样方内所选植物盖度在 85%以上(玉米除外),记录样方内物种及盖度。在样方中选取长势良好的植物 5—15 株,用铲子挖取完整的根系(狗牙根以群落为单位),取植物根周土壤为非根际土,然后将植物根表(0.4—4 mm 以内)附着的土壤用毛刷轻轻刷下,收集得到根际土,如果根际土不足,则可增加植株数量,直至根际土采集量充足。将采集的土壤样品混合,密封后带回室内,分析前仔细去除土样中可见的植物残体,磨碎过 100 目土壤筛后待测。

土壤采集结束,将植株装入编号的采样袋中,带回实验室分析其生物量特征。

### 1.2.3 测定项目与方法

土壤全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法,有效磷(AP)采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法,无机磷(IP)测定采用 1mol/L 盐酸提取-钼锑抗比色法<sup>[30]</sup>,有机磷(OP)为全磷和无机磷之差。

土壤中磷赋存形态的测定采用改进的 Hedley 连续分级提取法分级提取<sup>[27]</sup>,该方法利用不同的浸提液将土壤中磷赋存形态分为弱吸附态磷(WA-P)、潜在活性磷(PA-P)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)以及残渣态磷(R-P),具体步骤如下:取 3.0 g 风干土于 50mL 离心管中,分别依次用去离子水、0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>、0.1 mol/L NaOH 以及 1.0 mol/L HCl 各 25 mL 进行连续浸提,每种浸提液加入后,连续震荡 16 h,随后离心 10 min,收集上清液待测。每个提取程序中收集的上清液分为两份,一份利用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法测定全磷(P<sub>t</sub>),而另一份取 5 mL 调节 pH 后直接进行钼锑抗比色,测定待测液中的无机磷含量(P<sub>i</sub>),进一步用 P<sub>t</sub>减去 P<sub>i</sub>得到提取液中有机磷含量(P<sub>o</sub>)。最后,利用土壤总无机磷 IP 减去各形态 P<sub>i</sub>得到残渣态无机磷 R-P<sub>i</sub>,用总有机磷 OP 减去各形态 P<sub>o</sub>得到残渣态有机磷 R-P<sub>o</sub>。本研究磷的测定所用仪器为 UV-7504 单光束紫外-可见光分光光度计。

根际养分富集率(Enrichment Rate, ER)%=(根际土壤养分含量-非根际土壤养分含量)×100/非根际土壤养分含量。

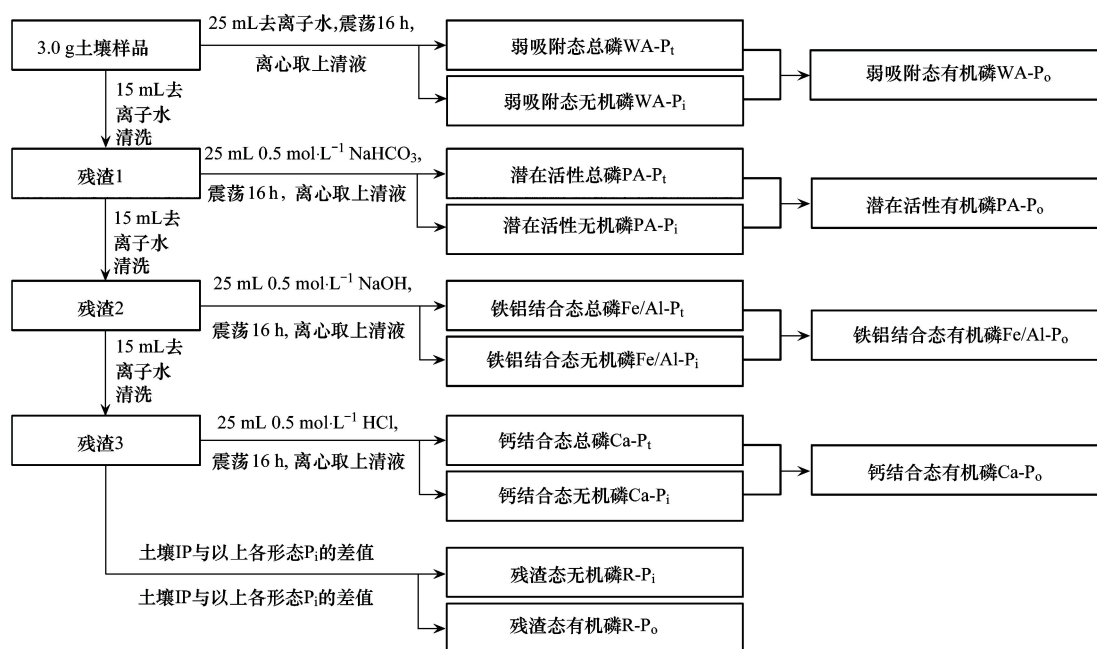


图1 土壤各形态磷素分级浸取示意

Fig.1 Sequential extraction process of phosphorus

### 1.3 数据处理

原始数据在 Excel 2007 中进行标准化处理,应用 SPSS 19.0 对试验数据进行方差分析和相关性分析,5% 水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

## 2 结果分析

### 2.1 不同土壤类型下典型植物根际土壤磷含量特征

图 2 所示 3 种土壤类型下不同植物根际与非根际土壤磷含量特征。其中,全磷(TP)含量表现为紫色土>冲积潮土>水稻土;4 种植物根际土壤全磷含量均高于非根际,且冲积潮土中达到显著水平( $P<0.05$ )。冲积潮土与紫色土中,植物根际与非根际土壤全磷含量均表现为狗牙根最高,苍耳与香附子次之,农田(玉米)最低;而水稻土中全磷 4 种植物根际及非根际土壤全磷含量未表现出显著差异,但也呈狗牙根最高。

有效磷(AP)含量冲积潮土最高,水稻土次之,紫色土最低,尽管紫色土全磷最高,但磷有效性较低。不同植物根际土壤有效磷含量高于非根际土壤(紫色土区的玉米和水稻土区的香附子、玉米除外);无论根际与非根际土壤,有效磷含量均表现为狗牙根>苍耳>香附子>玉米。

供试土壤无机磷(IP)含量占全磷的 49.1%—89.3%(平均 69.4%),且受土壤类型影响显著,紫色土>冲积潮土>水稻土;不论土壤类型如何,植物根际土壤无机磷含量均高于非根际土壤,表现出明显的根际富集效应。冲积潮土中 IP 含量在 3 种自然草本植物间没有差异,但显著高于玉米;水稻土和紫色土中,狗牙根根际土壤 IP 含量显著高于香附子和苍耳,玉米最低。可见耕作导致消落带土壤 IP 含量的降低。

三种土壤中有有机磷(OP)含量占全磷的 15.7%—42.6%(平均 28.6%),低于 IP 含量,且紫色土>冲积潮土>水稻土。水稻土有机磷含量受植物覆盖影响较小,冲积潮土和紫色土有机磷含量受植物种类影响较大,其中冲积潮土区狗牙根和苍耳非根际土壤有机磷含量显著高于苍耳和香附子,紫色土中 3 种草本植物覆盖非根际土壤有机磷含量显著高于玉米;不同植物根际土壤有机磷含量均高于非根际,且冲积潮土区狗牙根和香附子根际有机磷富集效应较强,紫色土区狗牙根、苍耳、玉米根际富集效应明显。

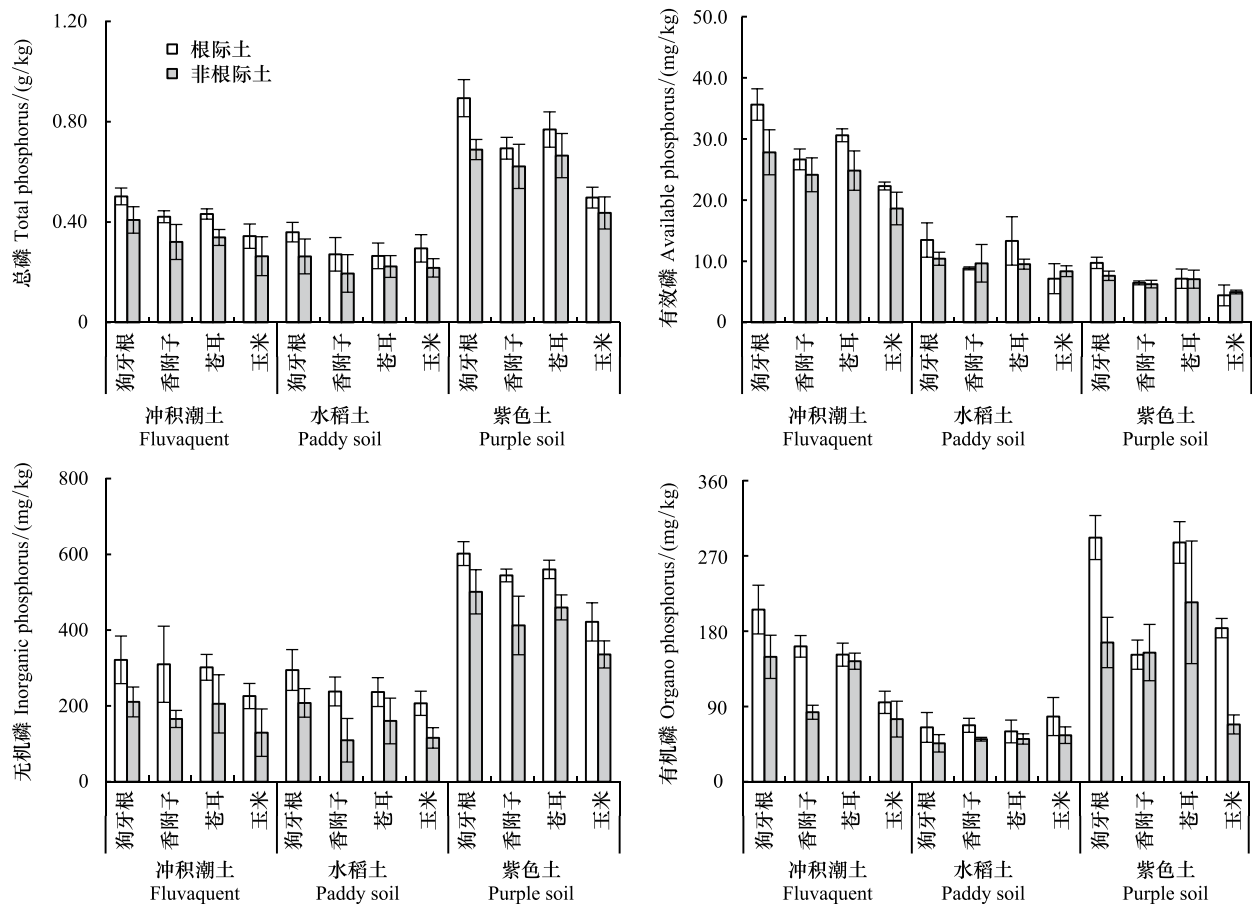


图2 消落带不同土壤类型4种典型植物根际与非根际土壤全磷(TP)、有效磷(AP)、无机磷(IP)及有机磷(OP)含量

Fig.2 Soil phosphorus status in the rhizosphere and non-rhizosphere of four herbaceous plants in three regions with different soil types in the three gorges reservoir area down

## 2.2 不同土壤类型下典型植物根际与非根际土壤无机磷形态分级

供试土壤弱吸附态磷( $WA-P_i$ )含量较低,范围为1.44—3.82 mg/kg;其中水稻土略高于冲积潮土,紫色土最低。植物覆盖显著改变了土壤中弱吸附态磷含量,其中苍耳和玉米种植区显著高于狗牙根和香附子(紫色土除外);而且所有植物根际土壤弱吸附态磷含量均高于非根际土壤。但由于植物的吸收作用,根际 $WA-P_i$ 占总无机磷含量的比例总是小于非根际土壤。弱吸附态磷在淹水后最容易释放到水体,玉米和苍耳根际较高的 $WA-P_i$ 含量对消落带磷的释放具有一定贡献。

潜在活性磷( $PA-P_i$ )较 $WA-P_i$ 稳定,但水淹条件下释放活性也较高。在不同土壤类型间 $PA-P_i$ 含量差异显著,水稻土<紫色土<冲积潮土。与 $WA-P_i$ 规律相似,4种植物覆盖区土壤 $PA-P_i$ 含量均表现为玉米>苍耳>香附子≈狗牙根的趋势,这种趋势在根际土中表现的更明显;与非根际土壤相比,4种植物根际土壤 $PA-P_i$ 含量显著增高,增幅达到8.0%—65.3%,三种土壤区,玉米土壤 $PA-P_i$ 的增幅均高于自然草本植物,表明农垦可能加速了消落带土壤无机磷的活化。

铁铝结合态无机磷( $Fe\backslash Al-P_i$ )主要是土壤中Fe\Al氧化物或氢氧化物结合态的磷,通常在厌氧条件下能够少量释放,是淹水期三峡水库磷负荷的潜在释放源<sup>[31]</sup>。本研究消落带土壤中Fe\Al结合态无机磷含量10.3—36.8 mg/kg,水稻土最低,冲积潮土最高,紫色土居中,植物根际土壤 $Fe\backslash Al-P_i$ 含量显著高于非根际;同一土壤类型下,4种植物覆盖区土壤(非根际) $Fe\backslash Al-P_i$ 含量并无显著差异,但根际土壤 $Fe\backslash Al-P_i$ 含量表现出明显差异,玉米最高,狗牙根最低,不同植物根际对土壤 $Fe\backslash Al-P_i$ 含量具有不同程度的影响。

供试消落带土壤中钙结合态磷( $\text{Ca-P}_i$ )是无机磷的主要形态,含量达 66.4—495.8 mg/kg,紫色土最高(375.8 mg/kg),冲积潮土和水稻土均较低(分别为 136.3 mg/kg 与 104.6 mg/kg);三种土壤条件下,植物根际土壤  $\text{Ca-P}_i$  含量均显著高于非根际,且均呈狗牙根>苍耳>香附子>玉米的趋势,这种趋势在根际土壤中更加显著。不同植物间根际土壤  $\text{Ca-P}_i$  含量变化规律与活性较高的  $\text{WA-P}_i$ 、 $\text{PA-P}_i$  含量完全相反,表明玉米和香附子可能加速  $\text{Ca-P}_i$  向活性磷的转化,导致根际土壤  $\text{Ca-P}_i$  含量降低,而  $\text{WA-P}_i$ 、 $\text{PA-P}_i$  含量较高,进而可能促使消落带磷的淋失和淹水后的释放。

残渣态磷( $\text{R-P}_i$ )属土壤中生物无效磷,本研究紫色土中  $\text{R-P}_i$  含量(57.6 mg/kg)高于水稻土(39.3 mg/kg),高于冲积潮土(27.7 mg/kg)。不同植物非根际土壤  $\text{R-P}_i$  含量差异较大,呈现狗牙根和苍耳覆盖区高于香附子和玉米,同时,玉米根际土壤中  $\text{R-P}_i$  含量均低于其他 3 种草本植物,表明农田的翻耕作用可能促使残渣态无机磷的流失;3 种草本植物根际土壤  $\text{R-P}_i$  高于非根际,而玉米根际与非根际之间没有明显差异。

供试土壤中  $\text{Ca-P}_i$  含量占比最高,其次是  $\text{R-P}_i$ ,三种活性较高的无机磷含量均较低。已知根际土壤无机磷含量高于非根际土壤,而活性较高的  $\text{WA-P}_i$ 、 $\text{PA-P}_i$  以及  $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_i$  占无机磷的百分比却表现为根际小于非根际,这可能受到植物根际活化作用和对活性无机磷的吸收有关。

### 2.3 不同土壤类型下典型植物根际与非根际土壤有机磷形态分级

有机磷是土壤重要磷库,可通过微生物降解、磷酸酶作用下转化为无机磷。本研究对供试土壤有机磷进行分析,结果如图 3 所示。弱吸附态有机磷( $\text{WA-P}_o$ )是土壤中极易矿化和迁移的磷形态,是有机磷中最活跃的形态,淹水条件下最容易释放进入水体 P 循环过程。供试土壤  $\text{WA-P}_o$  含量均较低,根际土壤  $\text{WA-P}_o$  含量为 0.54—3.36 mg/kg,略高于非根际土壤(0.52—2.39 mg/kg);不同土壤类型下  $\text{WA-P}_o$  含量表现为水稻土最高,冲积潮土次之,紫色土最低。同一土壤类型中,不同植物非根际土壤  $\text{WA-P}_o$  含量均呈现苍耳最高,玉米次之,狗牙根和香附子较低;4 种植物根际土壤  $\text{WA-P}_o$  差异更加显著,表现为狗牙根、香附子显著低于苍耳和玉米,而且根际效应差异明显,在玉米根际富集效应最大,苍耳次之,狗牙根和香附子相对较弱。可见消落带典型植物类型中,狗牙根和香附子覆盖下土壤活性有机磷释放的风险低于苍耳和玉米。

潜在活性有机磷( $\text{PA-P}_o$ )分解和释放活性略低于  $\text{WA-P}_o$ ,供试土壤中,紫色土和冲积潮土  $\text{PA-P}_o$  含量高于水稻土;4 种植物非根际土  $\text{PA-P}_o$  含量差异显著,但在不同土壤中表现出不同规律,可能与植物对有机磷利用差异有关;根际土壤  $\text{PA-P}_o$  含量受植物种类影响较大,冲积潮土和紫色土中玉米和苍耳根际土  $\text{PA-P}_o$  含量显著高于香附子和狗牙根,水稻土中玉米根际土壤  $\text{PA-P}_o$  含量显著高于其他 3 种草本植物。植物根际土壤  $\text{PA-P}_o$  含量均高于非根际,玉米和苍耳达到显著水平( $P<0.05$ ),说明植物根际效应可能刺激土壤中稳定性有机磷的活化,提高  $\text{PA-P}_o$  含量。

铁铝结合态有机磷( $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_o$ )是土壤活性有机磷中较稳定的部分,包括中活性的富里酸结合态有机磷和非活性的胡敏酸结合态有机磷<sup>[32]</sup>;土壤类型不同, $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_o$  含量差异显著,冲积潮土(11.3 mg/kg)与紫色土(11.1 mg/kg)显著高于水稻土(6.8 mg/kg)。不同植物覆盖对土壤(非根际土) $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_o$  含量产生重要影响,冲积潮土中狗牙根显著高于其他 3 种植物,而水稻土种则狗牙根低于其他 3 种植物,紫色土中香附子>狗牙根>玉米>苍耳。4 种植物根际土壤  $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_o$  含量均高于非根际,且在冲积潮土和紫色土中呈现香附子>狗牙根>玉米>苍耳的规律,表现出与  $\text{PA-P}_o$  和  $\text{WA-P}_o$  相反的规律,而水稻土中狗牙根仍然低于其他 3 种植物。不同土壤类型下,植物长势差异可能导致根际效应对稳定性磷的活化能力不同。

钙结合态有机磷( $\text{Ca-P}_o$ )主要是与钙、镁结合的有机磷,属于稳定性有机磷。本研究供试土壤  $\text{Ca-P}_o$  含量范围在 17.6—81.9 mg/kg,冲积潮土>紫色土>水稻土;不同植物覆盖对土壤  $\text{Ca-P}_o$  含量影响显著,尽管在不同土壤中这种影响强度不同,但均呈现出玉米土壤低于自然草本,表明农垦可能促使土壤  $\text{Ca-P}_o$  向活性有机磷转化;冲积土壤中,植物根际土壤  $\text{Ca-P}_o$  含量狗牙根和香附子较高,苍耳和玉米较低;水稻土中不同植物间差异不显著,紫色土中狗牙根根际土  $\text{Ca-P}_o$  含量显著高于其他植物。

表 2 消落带不同土壤类型 4 种典型植物根际与非根际土壤无机磷形态特征(±标准偏差)

Table 2 Distribution of inorganic phosphorus forms in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of four herbaceous plants in three regions with different soil types in the three gorges reservoir area down (±SD)

|                    | WA-P <sub>i</sub> |             |             | PA-P <sub>i</sub> |            |            | Fe/Al-P <sub>i</sub> |              |             | Ca-P <sub>i</sub> |            |   | R-P <sub>i</sub> |   |   |
|--------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|------------|------------|----------------------|--------------|-------------|-------------------|------------|---|------------------|---|---|
|                    | R                 | S           | R           | R                 | S          | R          | R                    | S            | R           | R                 | S          | R | R                | S | R |
| 冲积潮土<br>Fluvaquent | G                 | 2.70±0.23b  | 2.41±0.13a  | 15.3±2.4b         | 13.9±2.5b  | 34.6±3.7a  | 31.4±3.2a            | 243.6±47.7a  | 156.3±26.9a | 55.4±10.8a        | 34.7±16.1a |   |                  |   |   |
|                    |                   | 0.84%       | 1.15%       | 4.75%             | 6.60%      | 10.75%     | 14.90%               | 75.76%       | 74.20%      | 17.24%            | 16.46%     |   |                  |   |   |
|                    | X                 | 2.61±0.17b  | 2.30±0.08a  | 14.9±2.1b         | 15.0±1.4ab | 34.9±2.2a  | 32.3±1.4a            | 207.9±33.7ab | 132.9±61.0a | 35.8±5.3ab        | 21.0±4.2ab |   |                  |   |   |
| 紫色土<br>Purple soil | C                 | 0.84%       | 1.39%       | 4.79%             | 9.08%      | 11.26%     | 19.53%               | 67.06%       | 80.31%      | 11.54%            | 12.69%     |   |                  |   |   |
|                    | G                 | 3.26±0.30a  | 2.59±0.70a  | 16.4±1.5ab        | 14.7±0.6b  | 35.9±2.6a  | 30.8±2.5a            | 200.8±34.9ab | 161.4±33.0a | 45.4±13.5a        | 36.0±10.7a |   |                  |   |   |
|                    |                   | 1.08%       | 1.26%       | 5.44%             | 7.14%      | 11.88%     | 14.99%               | 66.56%       | 78.56%      | 15.03%            | 17.50%     |   |                  |   |   |
| 水稻土<br>Paddy soil  | Y                 | 3.46±0.29a  | 2.52±0.44a  | 18.4±2.0a         | 16.1±1.1a  | 36.8±3.9a  | 33.7±3.9a            | 145.0±25.4b  | 94.5±60.6a  | 21.2±11.2b        | 19.2±6.2b  |   |                  |   |   |
|                    | G                 | 1.53%       | 1.95%       | 8.15%             | 12.41%     | 16.27%     | 26.02%               | 64.12%       | 72.99%      | 9.40%             | 14.83%     |   |                  |   |   |
|                    | X                 | 2.84±0.34c  | 2.43±0.46b  | 6.3±1.2c          | 6.0±1.1b   | 12.4±2.2b  | 11.3±1.2b            | 216.3±35.5a  | 163.1±62.3a | 56.9±10.0a        | 43.7±14.2a |   |                  |   |   |
|                    | C                 | 0.96%       | 1.17%       | 2.13%             | 2.88%      | 4.22%      | 5.43%                | 73.36%       | 78.47%      | 19.32%            | 21.04%     |   |                  |   |   |
|                    | G                 | 3.13±0.64bc | 2.57±0.76ab | 8.1±0.8c          | 6.6±0.4b   | 13.6±2.3b  | 10.3±0.7b            | 169.2±18.3ab | 66.4±50.7b  | 44.1±5.5a         | 33.6±27.6a |   |                  |   |   |
|                    |                   | 1.31%       | 2.35%       | 3.40%             | 6.03%      | 5.71%      | 9.40%                | 71.05%       | 60.60%      | 18.52%            | 30.67%     |   |                  |   |   |
|                    | C                 | 3.82±0.35ab | 3.09±0.14ab | 9.5±0.7b          | 8.4±0.6a   | 18.5±4.2a  | 13.4±3.7a            | 150.4±48.0b  | 102.4±29.5b | 54.3±7.9a         | 49.9±7.8a  |   |                  |   |   |
|                    | G                 | 1.61%       | 1.93%       | 4.02%             | 5.23%      | 7.81%      | 8.38%                | 63.59%       | 63.84%      | 22.96%            | 31.13%     |   |                  |   |   |
|                    | X                 | 3.80±0.40a  | 3.31±0.75a  | 11.3±0.7a         | 8.6±0.7a   | 19.0±3.3a  | 11.5±2.5b            | 135.9±32.5b  | 86.3±13.2b  | 35.2±9.9b         | 29.7±17.3a |   |                  |   |   |
|                    | C                 | 1.84%       | 2.86%       | 5.46%             | 7.43%      | 9.21%      | 9.96%                | 65.75%       | 74.63%      | 17.01%            | 25.69%     |   |                  |   |   |
|                    | G                 | 1.44±0.20c  | 1.54±0.20b  | 11.2±1.5b         | 9.1±1.4b   | 22.5±1.5b  | 22.2±1.9a            | 495.8±92.3a  | 463.5±22.5a | 71.1±10.7a        | 56.8±30.6b |   |                  |   |   |
|                    |                   | 0.24%       | 0.31%       | 1.86%             | 1.82%      | 3.74%      | 4.43%                | 82.36%       | 92.47%      | 11.81%            | 11.33%     |   |                  |   |   |
|                    | X                 | 2.13±0.22b  | 1.95±0.26a  | 11.7±0.8b         | 9.6±1.0ab  | 25.7±2.5ab | 23.0±2.9a            | 447.0±18.2a  | 360.6±43.5b | 47.8±25.5b        | 47.0±23.3b |   |                  |   |   |
|                    | C                 | 0.39%       | 0.47%       | 2.15%             | 2.33%      | 4.73%      | 5.58%                | 82.12%       | 87.46%      | 8.77%             | 11.39%     |   |                  |   |   |
|                    | G                 | 2.44±0.14ab | 2.14±0.33a  | 12.3±1.1ab        | 9.4±0.7ab  | 23.6±3.7ab | 21.4±2.4a            | 431.0±29.0ab | 383.7±37.5b | 89.4±40.6a        | 75.3±11.5a |   |                  |   |   |
|                    | C                 | 0.43%       | 0.46%       | 2.19%             | 2.04%      | 4.22%      | 4.66%                | 76.94%       | 83.42%      | 15.96%            | 16.37%     |   |                  |   |   |
|                    | Y                 | 2.56±0.50a  | 2.38±0.49a  | 15.9±2.1a         | 10.7±1.1a  | 28.1±2.1a  | 21.8±2.8a            | 338.3±33.2b  | 295.3±45.4c | 36.6±7.1b         | 51.1±13.6b |   |                  |   |   |
|                    |                   | 0.61%       | 0.71%       | 3.78%             | 3.19%      | 6.66%      | 6.48%                | 80.23%       | 87.87%      | 8.67%             | 15.22%     |   |                  |   |   |

表中数据为 3 个重复的平均值与标准偏差;不同小写字母表示同一土壤类型下 4 种植物类型间在  $P=0.05$  水平差异显著性;R 表示根际土壤,S 表示非根际土;G:狗牙根,X:香附子,C:苍耳,Y:玉米;  
表中百分数表示每种无机磷形态占总无机磷含量的百分比

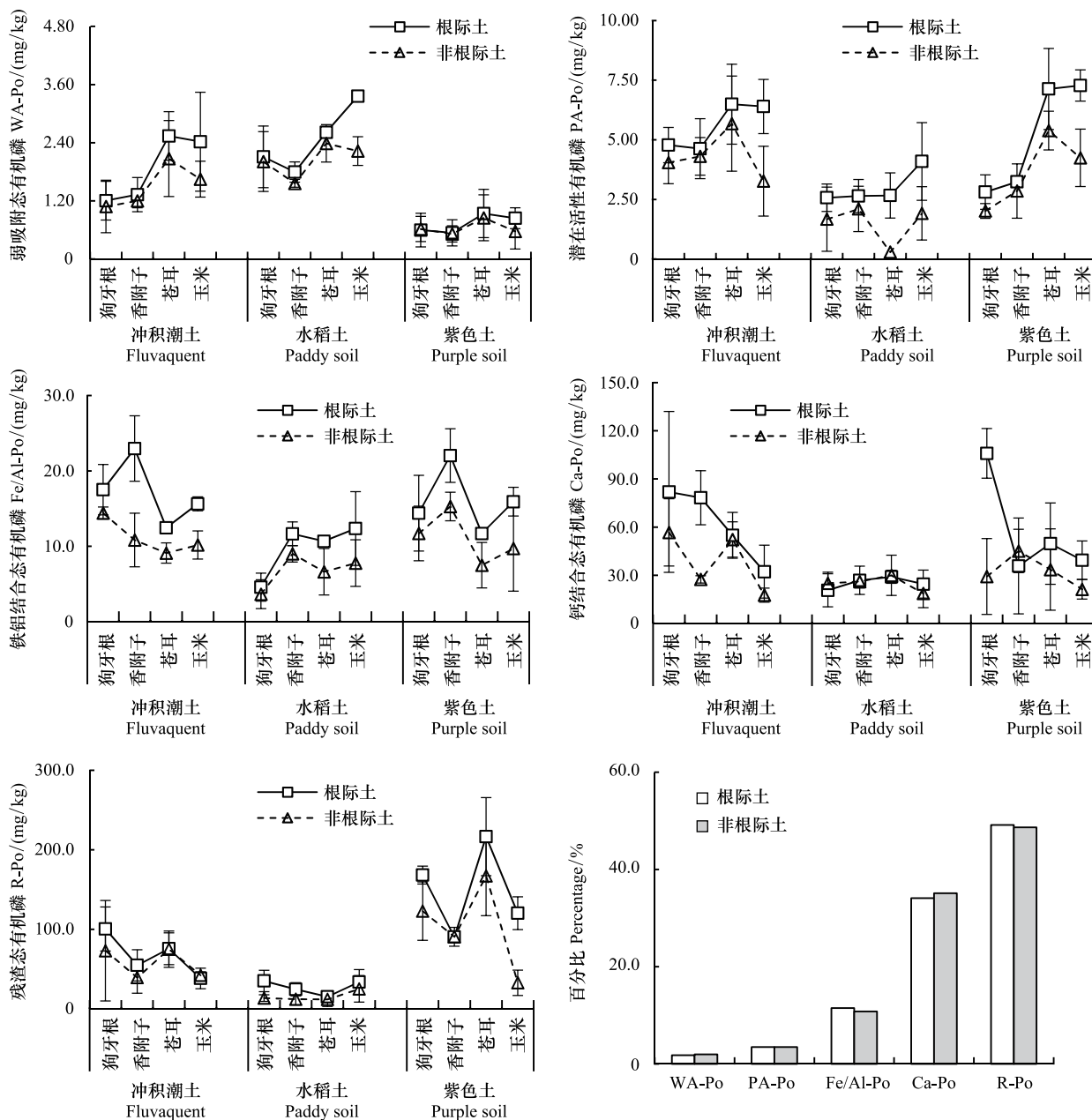


图3 消落带不同土壤类型4种典型植物根际与非根际土壤有机磷形态特征(图中误差线指给定样本的±标准偏差)

Fig.3 Distribution of organic phosphorus forms in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of four herbaceous plants in three regions with different soil types in the three gorges reservoir area down

残渣态有机磷(R-P<sub>o</sub>)属最不容易被矿化和分解的有机磷形态,是土壤有机磷库的重要部分。本研究冲积潮土中R-P<sub>o</sub>含量最高,水稻土次之,紫色土最低,R-P<sub>o</sub>含量受土壤类型影响显著。在冲积潮土和紫色土中,植物类型对R-P<sub>o</sub>含量的影响较大,不同植物间根际土和非根际土R-P<sub>o</sub>含量均呈现苍耳和狗牙根较高,香附子次之,玉米最低,而水稻土中供试土壤R-P<sub>o</sub>含量差异不大。

总体上,土壤类型不同,各形态有机磷含量差异显著,冲积潮土中5种形态有机磷含量均较高,而紫色土中WA-P含量显著低于其他土壤类型;水稻土具有较高的WA-P含量,但其他4种形态磷含量均低于紫色土和冲积潮土。植物类型差异是导致同一土壤类型中有机磷含量变异的关键因子,活性较高的WA-P和PA-P含量在狗牙根和香附子群落区低于苍耳和玉米;而稳定性有机磷则表现出相反趋势,表明狗牙根香附子更有

利于土壤 P 库的保持,而苍耳群落和玉米种植可能加速磷的流失。根际土壤与非根际土壤中不同形态有机磷组成特征基本一致。

#### 2.4 4 种植物根际对各形态磷素富集率特征

由图 4 可见,植物根际土壤无机磷形态指标具有显著的富集效应( $ER>0\%$ ),且玉米根际对土壤 3 种活性较高的无机磷形态( $PA-P_i$ 、 $WA-P_i$ 、 $Fe/Al-P_i$ )的富集率均高于其他 3 种自然草本植物,其 ER 值分别达到 23.3%、31.7%、34.5%;而 3 种草本植物对活性无机磷的 ER 值表现为苍耳>香附子>狗牙根。 $Ca-P_i$  的 ER 值香附子>玉米>狗牙根>苍耳,与前三中活性较高的无机磷有所不同。 $R-P_i$  的 ER 值狗牙根最高、香附子次之,苍耳和玉米较低,与其他磷形态规律完全相反,可见玉米和苍耳根际效应倾向于增强土壤磷活性,而狗牙根和香附子生长对土壤无机磷库有一定保持作用。

不同植物根际对土壤有机磷形态的富集效应表现出明显差异,玉米根际土壤对有机磷及其不同赋存形态都表现出较高的富集率,特别是对  $PA-P_o$ 、 $WA-P_o$ 、 $R-P_o$  和 OP 的 ER 值均高于 3 种自然草本。3 种草本植物对  $PA-P_o$ 、 $WA-P_o$  的 ER 值没有差异,而对  $Ca-P_o$ 、 $R-P_o$  及 OP 的 ER 值表现为狗牙根>香附子>苍耳,可见不同植物根际对土壤有机磷,特别是稳定性有机磷的影响不同。

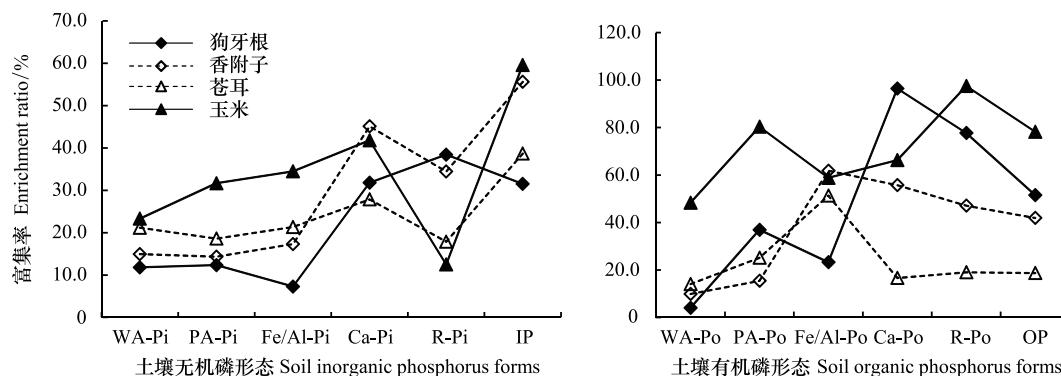


图 4 4 种植物根际土壤 P 形态指标富集率特征(数据为 3 种土壤类型下均值)

Fig.4 Enrichment rate of soil phosphorus forms in the rhizosphere of different herbaceous plants (the data was the mean of the three soil types)

#### 2.5 根际、非根际土壤磷形态与土壤理化性质的相关分析

表 3 对供试土壤 pH、有机质、容重与磷形态相关关系分析,结果显示,土壤 pH 与无机磷、有机磷形态具有显著的相关关系( $Re-P$  除外),其中与其活性较高的  $WA-P$ 、 $PA-P$  及  $Fe/Al-P$  均成显著的负相关关系,而与  $Ca-P_i$  有一定的正相关关系,可见植物根周土壤 pH 降低可能促使稳定性磷向活性磷转化。根际土壤中,有机质越高, $WA-P_i$ 、 $WA-P_o$  含量也随之增加, $R-P_o$  含量则显著降低,此外有机质含量与其他磷形态相关性不显著。土壤容重与土壤无机磷形态关系密切,且容重越大,活性无机磷含量越高,而稳定性无机磷含量越低,容重主要影响土壤紧实度和通气性,不同植物根系生长对土壤容重的影响也是引起无机磷形态改变的重要因素。

### 3 讨论

#### 3.1 不同植物根际与非根际土壤磷素状态

土壤类型是影响土壤磷形态和植物根际磷活化效率的关键因素<sup>[19]</sup>。本研究中冲积潮土、紫色土、水稻土的磷含量差异显著,其中紫色土全磷含量最高,但有效性较低,这与紫色土中活性磷形态较低结果一致。这种磷含量的差异有利于更好的分析消落带植物根际效应的普遍性。土壤类型差异导致供肥水平不同,进一步影响植物生长、养分吸收以及根际效应<sup>[19, 33]</sup>。同时,植物群落差异导致凋落物性质、微生物代谢以及土壤结构的发生改变,进而影响土壤营养物质的含量<sup>[34, 35]</sup>,是影响同一土壤类型中磷素状态的重要因素。本研究不同

植物非根际土壤磷素状态差异明显,总体表现为狗牙根覆盖区土壤磷素含量及有效性最高,苍耳次之,香附子和玉米较低,肯定了植物类型对土壤磷素状态的影响。土壤类型、植物类型以及水淹条件的交互作用是形成消落带土壤磷素空间分异的主要驱动,因此对三峡库区消落带土壤肥力演变研究需要着重考虑这三个因素的综合影响。

表 3 根际、非根际土壤磷形态与土壤 pH、有机质、容重的相关关系 ( $n=36$ )

Table 3 Correlation analysis of soil pH, organic matter, volume-weight and phosphorus forms in the rhizosphere and non-rhizosphere soil

|                      | 根际土壤 Rhizosphere soil |                       | 非根际土壤 Non-rhizosphere soil |                       |                     |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
|                      | pH                    | 有机质<br>Organic matter | pH                         | 有机质<br>Organic matter | 容重<br>volume-weight |
| WA-P <sub>i</sub>    | -0.481 **             | 0.657 **              | -0.442 **                  | 0.736 **              | 0.660 **            |
| PA-P <sub>i</sub>    | -0.675 **             | 0.242 *               | -0.695 **                  | 0.091                 | 0.428 **            |
| Fe/Al-P <sub>i</sub> | -0.876 **             | -0.219 *              | -0.831 **                  | 0.138                 | 0.416 *             |
| Ca-P <sub>i</sub>    | 0.403 *               | 0.132                 | 0.296 *                    | 0.131                 | -0.746 **           |
| R-P <sub>i</sub>     | 0.012                 | 0.158                 | 0.074                      | -0.259 *              | -0.478 **           |
| WA-P <sub>o</sub>    | -0.545 **             | 0.450 **              | -0.336 *                   | 0.106                 | 0.540 **            |
| PA-P <sub>o</sub>    | -0.635 **             | -0.104                | -0.446 **                  | -0.232                | 0.145               |
| Fe/Al-P <sub>o</sub> | 0.294 *               | -0.102                | -0.155                     | 0.181                 | 0.132               |
| Ca-P <sub>o</sub>    | 0.428 **              | 0.243                 | 0.484 **                   | -0.197                | -0.361 *            |
| R-P <sub>o</sub>     | 0.490 **              | -0.530 **             | 0.422 *                    | -0.146                | -0.586 **           |

根际是植物活根与土壤、微生物相互关联的重要微域,在植物营养过程和土壤养分循环中发挥重要功能<sup>[36]</sup>。大部分研究表明,植物根系存在的条件下,磷素有明显向根际迁移的趋势<sup>[37-39]</sup>,但由于植物根系的吸收作用,根际土壤磷含量往往低于非根际<sup>[37, 40]</sup>。然而,刘晶晶等<sup>[41]</sup>研究表明 3 种湿地植物,扁秆藨草、芦苇和茭白根际土壤全磷含量均明显高于非根际,表现出明显的富集效应,这与本研究结果一致。大量文献表明,湿地系统受水淹胁迫影响,植物对养分的吸收可能异于旱生系统<sup>[18, 39]</sup>。消落带土壤受季节性水淹影响,肥力和结构较差,植物根际磷富集是否是消落带适生植物的潜在适应机制尚需进一步研究。同时,受到植物根系和微生物代谢的强烈影响,根际土壤与非根际土壤磷的转化过程及生物有效性上具有明显差异<sup>[28]</sup>,本研究在冲积潮土和水稻土中,狗牙根、苍耳根际土壤有效磷含量高于香附子和玉米,而在有效磷含量较低的紫色土中,植物之间差异不显著。不同植物根际分泌物、根表脱落物以及磷酸酶活性的不同可能进一步导致根际土壤全磷组成的差异<sup>[32, 36]</sup>。本研究表明,4 种消落带植物根际土壤无机磷、有机磷等含量均高于非根际,这与部分湿地系统研究结果一致<sup>[18, 39]</sup>。在干旱区环境中,不同植物根际土壤无机磷和有机磷含量低于非根际<sup>[42]</sup>,而在湿地系统中,不同湿地植物根际效应对土壤无机磷和有机磷含量的影响研究结果并不一致<sup>[18, 39, 41, 43]</sup>。通常植物根系吸收,根周土壤磷素向根际富集,一部分难利用的 Ca-P 和 Re-P 被截留在根际,而 Ca-P 和 Re-P 往往占总磷的 80% 以上,是导致植物根际有机磷和无机磷富集的重要原因。本研究中,玉米根际土壤无机磷含量均低于三种草本植物,而有机磷则在不同土壤类型区呈不同规律。对于耕地而言,季节性水淹导致土壤磷的流失较快,土壤较为瘠薄,因此玉米根际和非根际土壤中磷素状态均低于 3 种草本植物。香附子根际土壤氮含量较高<sup>[10]</sup>,可能促使磷素的代谢,因此低于狗牙根和苍耳。总体上自然草本群落有利于土壤磷素的保持,特别是狗牙根覆盖对消落带土壤磷库保持具有一定的促进作用。

### 3.2 不同植物根际与非根际土壤无机磷形态变化

土壤无机磷形态中,WA-P<sub>i</sub>、PA-P<sub>i</sub>以及 Fe/Al-P<sub>i</sub>易在淹水条件下转化成溶解性磷并释放到上覆水中,有较强的释放活性,被称为活性磷,是水体内部磷的重要来源<sup>[9, 24]</sup>。本研究中,土壤类型对土壤无机磷形态构成具有显著影响(表 2),这可能是导致三峡库区不同区域土壤磷形态差异的重要因素<sup>[16, 22, 25-26]</sup>。紫色土具有较低的活性无机磷和较高的稳定性无机磷,而冲积潮土则与之相反,水稻土 WA-P<sub>i</sub>含量较高外,其他形态无机

磷含量均处于较低水平。可见消落带紫色土淹水条件下磷释放潜势最小,而水稻土和冲积潮土较高,这也与土壤总磷水平相呼应。因此消落带土壤养分循环和土壤发育等研究中,需要关注不同土壤类型对淹水条件的响应。

土壤类型差异可能是库区水平上土壤磷空间分异的重要驱动,而植物群落的演变则可能引起同一土壤类型区无机磷形态的空间变化。消落带夏季植物生长,不仅吸收固定了一部分无机磷,同时根际作用也可能改变土壤磷赋存形态,从而导致土壤磷素状态的差异(图2)。植物根际作用对土壤磷形态的影响研究较多,且主要存在三种机制:(1)根际土壤中碳沉积作用导致土壤有机质积累,进而刺激根际微生物活性的显著提高,影响根际磷素形态的转化过程<sup>[28, 35, 44]</sup>;(2)植物根际分泌有机酸能够促使稳定性磷的活化,改变土壤磷形态<sup>[18, 40]</sup>;(3)植物根系对活性无机磷的吸收,并间接促使非根际土壤磷向根际的迁移。本研究中,土壤各形态无机磷含量受植物覆盖的影响明显,且均有明显的根际富集现象(表2),植物根际效应确实改变了消落带土壤无机磷赋存形态,对水库磷循环具有潜在影响。土壤中  $WA-P_i$  和  $PA-P_i$  活性最高,也最容易被植物吸收,因此一些研究中生长旺盛的植物根际土壤活性磷低于非根际土壤<sup>[41]</sup>。然而,本研究中4种植物根际土壤  $WA-P_i$  和  $PA-P_i$  均显著高于非根际,可能是消落带植物生长具有较强磷活化能力,而受水淹胁迫影响,植物长势较差,磷吸收能力较弱等原因所致,这与一些湿地植物根际效应研究相似<sup>[18, 39, 41]</sup>。以往有研究认为,在胁迫环境中,植物能够通过增强根系有机酸类物质的分泌以达到更有效的养分获取<sup>[29, 38]</sup>。相关分析中土壤 pH 与活性较高的无机磷呈负相关,而与  $PA-P_i$ 、 $Re-P_i$  呈正向关(表3),反映出消落带植物可能通过根系分泌小分子有机酸使得  $Fe/Al-P_i$  和部分  $Ca-P_i$  活化转化为  $WA-P_i$  和  $PA-P_i$ ,从而导致土壤无机磷的淹水释放风险提高。不同植物根际对磷的活化机制及富集能力不同,玉米和苍耳根际  $WA-P_i$ 、 $PA-P_i$ 、 $Fe/Al-P_i$  含量和富集率显著高于狗牙根和香附子,而其根际土壤  $Ca-P_i$  含量和富集率则低于狗牙根,表明玉米和苍耳的根际具有更强的  $Ca-P_i$  活化能力和加速根际土壤养分的流失潜势,这也可能是导致玉米覆盖区 IP 较低的原因。消落带土壤类型和植物群落演变对土壤无机磷的转化及空间分异特征具有重要影响,消落带生态修复工作中一方面需要考虑土壤类型的差异性,另一方面狗牙根和香附子生长更有利于磷素的保持,农耕可能加速消落带土壤退化和养分流失。

### 3.3 不同植物根际与非根际土壤有机磷形态变化

以往研究中,对土壤有机磷的研究相对薄弱,但总体上将有机磷分为高稳定性有机磷( $R-P_o$ )、中稳定性有机磷( $Ca-P_o$ )、中等活性有机磷( $Fe/Al-P_o$ )和活性有机磷( $PA-P_o$ 、 $WA-P_o$ )。本研究表明,消落带不同类型土壤中有机磷含量  $R-P_o > Ca-P_o > Fe/Al-P_o > PA-P_o > WA-P_o$ ,这与其他湿地系统<sup>[41]</sup>和消落带研究结果相似<sup>[24]</sup>,活性较高的有机磷更容易酶解或直接溶解而损失,对三峡水库水环境安全影响较大。土壤类型不同,有机磷形态组成也有显著差异,同无机磷形态相似,紫色土  $WA-P_o$  显著低于冲积潮土和水稻土,但  $R-P_o$  含量远高于二者,表明紫色土磷库比冲积潮土和水稻土更稳定,在季节性水淹浸提影响下,冲积潮土和水稻土磷释放潜势最高,是生态修复的重要节点。

植物生长可以提高土壤中酸性或碱性磷酸酶含量,促使活性有机磷的酶解矿化进而被植物利用<sup>[43]</sup>;同时植物根际活性养分的富集能够聚集大量的解磷微生物,加速稳定性有机磷向活性有机磷转化<sup>[10, 20, 45]</sup>。本研究中消落带的4种植物根际  $PA-P_o$ 、 $WA-P_o$  均呈明显的富集,特别是玉米和苍耳显著高于狗牙根和香附子,这与活性无机磷规律一致,表现出消落带植物根际“高活化、低吸收”特征。玉米根际土壤  $PA-P_o$ 、 $WA-P_o$  的富集率显著高于自然草本植物,主要与翻耕改变了土壤孔隙及氧气供应,加速了稳定性有机磷向活性有机磷的转变有关<sup>[13]</sup>,而玉米根际富集的活性有机磷进一步分解为小分子化合物或磷酸盐释放到间隙水中,加速库区磷素的循环,这也与玉米地有机磷含量较低形成呼应。另外,紫色土和冲积潮土中玉米和苍耳根际土壤中等活性有机磷( $Fe/Al-P_o$ )显著低于狗牙根和香附子,也进一步说明玉米和苍耳覆盖导致土壤  $Fe/Al-P_o$  向活性有机磷转化,导致  $Fe/Al-P_o$  的消耗和活性有机磷富集。另外,植物老根衰败和表面脱落物在根际聚集,增加土壤有机质含量,进而影响稳定性有机磷的富集<sup>[20, 32]</sup>。植物根际对磷素的“泵拉作用”也使得非根际土壤中有机磷

向根际的迁移<sup>[40]</sup>,因此,部分研究中植物根际土壤中活性有机磷含量均高于非根际。 $\text{pH}$ 是影响土壤有机磷形态的重要因素,与非残渣态磷含量成负相关关系<sup>[46]</sup>,本研究中植物根际土壤  $\text{pH}$  低于非根际,可能加速稳定性有机磷的活化。从根际土壤有机磷富集率看,消落带土壤中狗牙根根际对活性磷富集率较低,稳定性有机磷富集率较高,表明其对土壤中易流失的磷的固定作用较强,有利于减缓磷素的淹水释放,而消落带开展农垦活动可能对土壤磷释放起到根际“泵-解”效应,应得到重点关注。

总体上,植物覆盖提高了土壤全磷的含量,既提高了土壤  $\text{IP}$ ,也提高了  $\text{OP}$ ,但改变了土壤中  $\text{IP}$  和  $\text{OP}$  的赋存形态。结果表明,狗牙根和香附子根际土壤中中等活性和活性磷形态含量低于玉米和苍耳,而稳定性磷含量则相反。玉米和苍耳覆盖可能加速土壤稳定性磷的活化,间接提高了淹水后土壤磷的释放;而狗牙根覆盖在一定程度上有利于稳定性磷的富集和活性磷的固定,因此对消落区土壤磷库的保持具有积极效应。最后,植物覆盖影响消落带土壤磷形态转化的主要途径:(1)植物根系吸收矿化态磷特性差异,导致根际土壤不同形态无机磷比例改变,进而改变根际土壤磷形态转化过程;(2)根际沉积效应差异导致根际微生物活性增强,微生物代谢对土壤磷矿化的影响,促使磷形态改变;(3)植物根系分泌有机酸,促使根际磷活化过程;(4)植物根际效应导致根际土壤  $\text{pH}$  值差异,而  $\text{pH}$  与有机、无机磷赋存形态呈显著相关关系,可能是植物根系影响氮形态转化的原因之一;(5)不同植物覆盖区土壤有机质、有效磷与磷形态存在相关关系,不同植物根际土壤有机质和有效磷等化学特征的改变是磷形态转化的可能原因。土壤类型和植物群落类型是导致消落带土壤磷形态空间分异的关键因素,进而对不同区域土壤磷释放特征产生影响,而在水库磷循环和生态修复研究中,应更重视这两个因子的影响,特别是狗牙根可以作为消落带恢复的较好的物种,但同时应注意群落结构恢复,避免单一群落带来的磷的根际富集和流失影响。

#### 4 结论

(1)消落带土壤磷素状态受土壤类型和植物根际的双重影响,紫色土全磷、无机磷、有机磷含量较高,冲积潮土次之,水稻土最低;不同植物根际土壤磷含量均高于非根际土壤,表现出明显的磷富集现象;同一土壤中,不同植物根际与非根际土壤磷素含量均呈现狗牙根>苍耳>香附子>玉米,自然草本植物对土壤磷素的保持和提升效果优于农作物玉米,且狗牙根和苍耳效果最好。

(2)土壤类型对消落带土壤有机磷、无机磷形态有重要影响。紫色土中  $\text{WA-P}$  含量均低于冲积潮土和水稻土,且具有较高的  $\text{Ca-P}$  和  $\text{Re-P}$ ;在季节性水淹没影响下,紫色土磷库最稳定,而冲积潮土和水稻磷释放风险较高。

(3)消落带不同植物覆盖对土壤无机磷形态影响较大,且根际土均高于非根际土,表现出显著的富集效应;其中土壤  $\text{WA-P}_i$ 、 $\text{PA-P}_i$  含量在狗牙根、香附子群落区均低于玉米和苍耳覆盖区,而且根际土壤中表现的更加显著; $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_i$  在不同植物非根际土中没有显著差异,但根际土壤中玉米高于狗牙根和香附子; $\text{Ca-P}_i$ 、 $\text{R-P}_i$  含量则表现为狗牙根和苍耳高于香附子和玉米;从根际富集率看,玉米根际对活性无机磷( $\text{WA-P}_i$ 、 $\text{PA-P}_i$ 、 $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_i$ )的富集明显强于3种自然草本植物,而对  $\text{R-P}_i$  富集率最低;3种草本植物对活性无机磷的富集率表现为苍耳>香附子>狗牙根,而对  $\text{Ca-P}_i$ 、 $\text{R-P}_i$  富集率表现相反规律玉米群落和苍耳群落区土壤活性磷含量和富集率均高于香附子和狗牙根,可能促使土壤磷库活化和淹水后的释放。

(4)不同植物覆盖区消落带土壤有机磷形态变化显著, $\text{WA-P}_o$ 、 $\text{PA-P}_o$  基本呈玉米>苍耳>香附子>狗牙根,而  $\text{Fe}\backslash\text{Al-P}_o$ 、 $\text{Ca-P}_o$  呈狗牙根最高,香附子和苍耳较低,玉米最低; $\text{R-P}_o$  在不同土壤中植物影响不同,但总体呈狗牙根和苍耳高于香附子和玉米;玉米根际对有机磷的富集率较高,对  $\text{PA-P}_o$ 、 $\text{WA-P}_o$ 、 $\text{R-P}_o$  和  $\text{OP}$  的富集性均高于3种自然草本;狗牙根根际  $\text{Ca-P}_o$  和  $\text{R-P}_o$  富集率较高,相比其他草本植物而言更有利于土壤磷库的保持。

(5)植物根际土壤  $\text{pH}$  值与土壤无机、有机磷形态相关性较强,是影响土壤磷赋存形态的重要因素,有机质和容重对土壤无机磷形态影响作用明显。

## 参考文献 (References):

- [1] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, Xiong S, Li B, Deng W. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [2] Wang Q, Yuan X Z, Willison J H M, Zhang Y W, Liu H. Diversity and above-ground biomass patterns of vascular flora induced by flooding in the drawdown area of China's Three Gorges Reservoir. *PLoS One*, 2014, 9(6): e100889.
- [3] 陈忠礼, 袁兴中, 刘红, 李波. 水位变动下三峡库区消落带植物群落特征. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(6): 672-677.
- [4] 童笑笑, 陈春娣, 吴胜军, 贾振毅, 易雪梅, 马茂华. 三峡库区澎溪河消落带植物群落分布格局及生境影响. *生态学报*, 2018, 38(2): 571-580.
- [5] 朱妮妮, 郭泉水, 秦爱丽, 顺祥, 马凡强, 朱莉, 简尊吉. 三峡水库奉节以东秭归和巫山段消落带植物群落动态特征. *生态学报*, 2015, 35(23): 7852-7867.
- [6] Ma L M, Rena D, Zhang M, Zhao J F. Phosphorus fractions and soil release in alternately waterlogged and drained environments at the water-fluctuation-zone of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2010, 8(3/4): 1329-1335.
- [7] Zhang B, Fang F, Guo J S, Chen Y P, Li Z, Guo S S. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 153-159.
- [8] Shen Z Y, Chen L, Hong Q, Qiu J L, Xie H, Liu R M. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area. *Science of the Total Environment*, 2013, 454-455: 383-392.
- [9] 朱强, 安然, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 王素梅. 三峡库区消落带土壤对磷的吸附和淹水下磷的形态变化. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1128-1135.
- [10] 王晓锋, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生. 三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态. *环境科学*, 2015, 36(10): 3662-3673.
- [11] 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 方芳, 付川. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 213-219.
- [12] Xiang Y P, Du H X, Shen H, Zhang C, Wang D Y. Dynamics of total culturable bacteria and its relationship with methylmercury in the soils of the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(24): 2966-2972.
- [13] 马朋, 李昌晓, 雷明, 杨予静, 马骏. 三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征. *生态学报*, 2014, 34(4): 1010-1020.
- [14] 杨文航, 秦红, 任庆水, 贺燕燕, 李晓雪, 李昌晓. 三峡库区消落带重建植被下土壤微生物生物量碳氮含量特征. *生态学报*, 2017, 37(23): 7947-7955.
- [15] 方芳, 孙志伟, 高红涛, 郭劲松, 李哲. 三峡库区消落带土壤  $N_2O$  排放及反硝化研究. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(2): 287-293.
- [16] Ouyang W J, Li Z, Liu J, Liu J, Guo J S, Fang F, Xiao Y, Lu L H. Inventory of apparent nitrogen and phosphorus balance and risk of potential pollution in typical sloping cropland of purple soil in China - A case study in the Three Gorges Reservoir region. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 620-628.
- [17] 雷波, 王业春, 由永飞, 张晟, 杨春华. 三峡水库不同间距高程消落带草本植物群落物种多样性与结构特征. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 600-606.
- [18] Moorberg C J, Vepraskas M J, Niewoehner C P. Phosphorus dissolution in the rhizosphere of bald cypress trees in restored wetland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(1): 343-355.
- [19] Erel R, Bérard A, Capowicz L, Doussan C, Arnal D, Souche G, Cavaland A, Fritz C, Visser E J W, Salvi S, Le Marié C, Hund A, Hinsinger P. Soil type determines how root and rhizosphere traits relate to phosphorus acquisition in field-grown maize genotypes. *Plant and Soil*, 2017, 412(1/2): 115-132.
- [20] Zhou W J, Sha L Q, Schaefer D A, Zhang Y P, Song Q H, Tan Z H, Deng Y, Deng X B, Guan H L. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 255-258.
- [21] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 高进长, 阎丹丹. 三峡库区消落带几种草地根系分布及土壤养分变化. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 151-157.
- [22] 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁. 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征. *环境科学*, 2018, 39(1): 130-136.
- [23] 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁. 三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征. *环境科学*, 2018, 39(9): 4161-4168.
- [24] 黄俊杰, 王超, 方博, 冯磊, 方芳, 李哲, 郭劲松. 三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征. *环境科学*, 2017, 38(9): 3673-3681.
- [25] 刘娜, 李璐璐, 魏世强. 三峡库区消落带沉积物与土壤磷形态及分配特征研究. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 261-267, 287-287.

- [26] 曹琳, 吉芳英, 林茂, 黎司, 王图锦. 三峡库区干湿交替消落区土壤磷形态. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 101-106.
- [27] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 970-976.
- [28] Cabugao K G, Timm C M, Carrell A A, Childs J, Lu T S, Pelletier D A, Weston D J, Norby R J. Root and rhizosphere bacterial phosphatase activity varies with tree species and soil phosphorus availability in puerto rico tropical forest. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1834.
- [29] Betencourt E, Duputel M, Colomb B, Desclaux D, Hinsinger P. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 181-190.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [31] Ruban V, Brigault S, Demare D, Philippe A M. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(4): 403-407.
- [32] Zhu Y R, Wu F C, He Z Q, Guo J Y, Qu X X, Xie F Z, Giesy J P, Liao H Q, Guo F. Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7679-7687.
- [33] 李志洪, 陈丹, 曹国军. 黑土、黑钙土玉米苗期根际无机磷的形态变化. 土壤学报, 1999, 36(1): 127-131.
- [34] Arruda B, Dall'orsoletta D J, Heidemann J C, Gatiboni L C. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of two wheat cultivars in a soil with high organic matter content. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(7): 1011-1020.
- [35] Wang Y L, Krogstad T, Clarke J L, Hallama M, Øgaard A F, Eich-Greatorex S, Kandeler E, Clarke N. Rhizosphere organic anions play a minor role in improving crop species' ability to take up residual phosphorus (P) in agricultural soils low in P availability. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1664.
- [36] Zhu B, Gutknecht J L M, Herman D J, Keck D C, Firestone M K, Cheng W X. Rhizosphere priming effects on soil carbon and nitrogen mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 183-192.
- [37] Stewart R E, Hodges S C, Mulvaney M J, Pavuluri K, Thomason W E. Rhizosphere phosphorus solubility and plant uptake as affected by crop in a clay soil from the central plateau region of haiti. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45(5): 703-712.
- [38] Ye D H, Zhang X Z, Li T X, Xu J, Chen G D. Phosphorus-acquisition characteristics and rhizosphere properties of wild barley in relation to genotypic differences as dependent on soil phosphorus availability. *Plant and Soil*, 2018, 423(1/2): 503-516.
- [39] Zhu J, Qu B, Li M. Phosphorus mobilization in the Yeyahu Wetland: Phosphatase enzyme activities and organic phosphorus fractions in the rhizosphere soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 304-313.
- [40] Zhao K, Wu Y Y. Rhizosphere calcareous soil P-extraction at the expense of organic carbon from root-exuded organic acids induced by phosphorus deficiency in several plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(5): 640-650.
- [41] 刘晶晶, 李敏, 曲博, 其美. 湿地挺水植物根系土壤中的磷形态变化与分析. 中国环境科学, 2013, 33(11): 2040-2046.
- [42] 薛梓瑜, 周志宇, 詹媛媛, 任伟. 干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征. 生态学报, 2010, 30(2): 341-349.
- [43] 朱芸芸, 李敏, 曲博, 赵墩, 滕泽栋. 湿地植物根际土壤磷酸酶活性变化规律研究. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 106-112.
- [44] Teng Z D, Zhu Y Y, Li M, Whelan M J. Microbial community composition and activity controls phosphorus transformation in rhizosphere soils of the Yeyahu Wetland in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 1266-1277.
- [45] Zhang Z Y, Hu H Q, Wan C Y, Peng J H, Xu F L, Shi F. Lateral and longitudinal variation in phosphorus fractions in surface sediment and adjacent riparian soil in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 31262-31271.
- [46] Hou E Q, Wen D Z, Kuang Y W, Cong J, Chen C R, He X J, Heenan M, Lu H, Zhang Y G. Soil pH predominantly controls the forms of organic phosphorus in topsoils under natural broadleaved forests along a 2500km latitudinal gradient. *Geoderma*, 2018, 315: 65-74.