

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2014.12.021

三峡库区典型消落区土壤氮磷的动态变化特征*

李楚娴^{1,2} 张金洋^{1,2**} 王定勇^{2,3,4} 余亚伟² 孙荣国² 张成² 李强²

(1. 内江师范学院化学化工学院, 内江, 641112;

2. 西南大学资源环境学院, 土壤多尺度界面过程与调控重庆市重点实验室, 重庆, 400715;

3. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆, 400716; 4. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆, 400716)

摘要 在三峡库区干流段忠县石宝寨与支流段汝溪河涂井设置固定采样点, 研究1年内不同月份、不同高程出露表层土壤氮、磷含量随水位变化特征。结果表明, 干流石宝寨点(未淹区/消落区)土壤中全氮、全磷年均含量分别为(0.68/0.74)、(0.56/0.54) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而支流涂井点为(0.67/0.80)、(0.52/0.65) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 干支流采样点消落区全氮含量在7月累积量最明显, 全磷含量在9月最高; 相应干流采样点的速效氮、速效磷年均含量分别为(39.81/40.42)、(11.75/14.22) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而支流采样点为(35.63/48.89)、(6.72/7.68) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 干支流采样点消落区速效氮含量在9月累积量最明显, 速效磷含量在7月最高, 与相应全量特征不同。可见, 消落区土壤氮磷全量高, 其相应速效态含量未必高。较于未淹区, 干流石宝寨与支流涂井消落区土壤氮磷含量在落干期间均表现出一定的积累, 且涂井点的累积量明显高于石宝寨点, 待水位上涨时, 汝溪河的潜在富营养化风险更大。

关键词 三峡库区, 消落区, 土壤, 氮, 磷。

Dynamic variations of nitrogen and phosphorous of the soil in hydro-fluctuation of Three Gorges Reservoir

LI Chuxian^{1,2} ZHANG Jinyang^{1,2**} WANG Dingyong^{2,3,4} YU Yawei²
SUN Rongguo² ZHANG Cheng² LI Qiang²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Neijiang Normal University, Neijiang, 641112, China;

2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Soil Multi-scale Interfacial Process, Chongqing, 400715, China; 3. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural

Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing, 400716, China;

4. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing, 400716, China)

Abstract: Typical main stream (Shi Baozhai) and tributary (Tu Jing, Ru Xihe) were chosen as sample plots. The characteristics of nitrogen and phosphorous in soil with water level fluctuating in one year were investigated. The results showed that, average annual contents of the total nitrogen and total phosphorous in the control (not flooded soil) /hydro-fluctuation were 0.68/0.74 and 0.56/0.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in main-stream, 0.67/0.80 and 0.52/0.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in tributary, respectively. Moreover, the contents of total nitrogen on July were the highest, while total phosphorous on September. Meanwhile, average annual contents of the available nitrogen and available phosphorous in the control/Hydro-Fluctuation were 39.81/40.42 and 11.75/14.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in main-stream, 35.63/48.89 and 6.72/7.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in tributary, respectively. The contents of available nitrogen on September were the highest, while available phosphorous on July. Therefore, the total contents of soil nutrient in Hydro-Fluctuation were high, nor did the available contents. Compared with the control,

2014年6月23日收稿.

* 国家自然科学基金项目(41173116)资助.

** 通讯联系人, E-mail: goldensea73@163.com

the contents of nitrogen and phosphorous in Hydro-Fluctuation of Shi Baozhai and Ru Xihe had accumulated a lot during the non-flooded period. In addition, the accumulation of soil nutrient in Ru Xihe outweighed that in Shi Baozhai, which indicated that the risk of potential eutrophication in Ru Xihe was higher.

Keywords: Three Gorges Reservoir, hydro-fluctuation, soil, nitrogen, phosphorous

三峡水库是我国举世瞩目的特大调节型水库,每年3月开始排水逐渐降至最低水位145 m,9月开始蓄水至175 m,形成垂直落差达30 m的消落区^[1].该消落区属于季节性干湿交替的水陆衔接地带,在汛期时因水体的化学作用,其表层土壤逐渐具有类似底泥的性质,可直接与上覆水进行物质交换^[2];在退水成陆时是库周泥沙、有机物、农药化肥等进入水域的最后一道屏障^[3],且易受雨水冲刷及地表径流带来的污染物等影响,这都将导致水库消落区土壤养分在空间及时间上有较大的变异性^[4],进而可能会影响到库区土壤环境质量,待水位上涨时消落区土壤中的污染物重新释放对库区水体水质的影响不可忽视.

土壤中氮磷的释放可能会引起水体富营养化,从而影响库区水质.目前一些学者对三峡库区消落区土壤氮磷含量变化进行了野外调查研究^[5-8],指出库区土壤氮磷含量偏高.而实验室模拟研究^[9-10]揭示库区土壤具有释放氮磷的能力,若条件满足,释放风险较大.这些研究成果为深入探讨三峡水库运行后消落区土壤的变化提供了重要的参考,但要定量评价消落区土壤周期性淹没对水体的危害程度,还需进一步进行现场原位观测.消落区土壤氮磷含量变化与水位涨落、气候地质、生物过程、人为活动等密切相关,其中最主要的是水位大幅变化^[11-12].

本研究在上游典型干、支流区域选择忠县石宝寨新政村和涂井乡坪山村为采样点,观测了一个周期内(1年)不同月份、不同高程出露土壤氮、磷含量随水位变化特征,以期了解典型干、支流区域土壤氮磷及其有效态含量的变化特征,对预示消落区土壤养分的演变趋势以及水体富营养化的风险程度提供基础数据及理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择三峡库区腹地地带位于干流的忠县石宝寨新政村(N:30°24'36",E:108°12'3")和位于支流汝溪河的忠县涂井乡坪山村(N:30°25'40",E:108°7'41")为采样点.忠县属川东暖湿亚热带东南季风区,年均气温18.1℃,年均降雨量为1193 mm,夏季雨水较多,降雨量占全年的38%,最多可达56%,且多集中在6月初与7月上旬,7月中、下旬易出现高温伏旱,极端气温在39℃以上.忠县消落区面积较大,145—155 m、155—165 m、165—175 m区段面积分别为8.18 km²、13.53 km²、12.00 km²,总计33.71 km²,占重庆市消落区总面积的9.66%,土壤类型以紫色土为主^[13-14],属三峡库区典型消落区.干支流研究区不同水位高程采样点均为未翻耕的荒草地,生长植物为三峡库区消落区优势植物——狗牙根.两块样地土壤性质相似、周边环境相近,在研究水位波动对消落区土壤氮磷含量变化的影响方面具有较好的代表性和可比性.

1.2 土壤样品的采集与分析方法

两块监测样地(图1)采集样品的时间及方式一致,均在2011年1、3、5、7、9、11月中旬采样,采样期间的水位、土温及区段见表1.在每个采样区段使用洛阳铲采集固定样方(2 m×2 m)的3—4个荒草地的表层土样,混合、密封于聚乙烯袋中,并带回实验室自然风干、研磨、过60目筛后进行化学分析测定.所有土样均重复测定3次.

土样有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,总氮采用凯氏法测定,速效氮含量采用速效扩散法测定,总磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定,速效磷采用比色法测定,pH采用pH酸度计法(Sartorius PT-10, German)测定.

利用Excel 2013和SPSS16.0软件对数据进行统计分析.

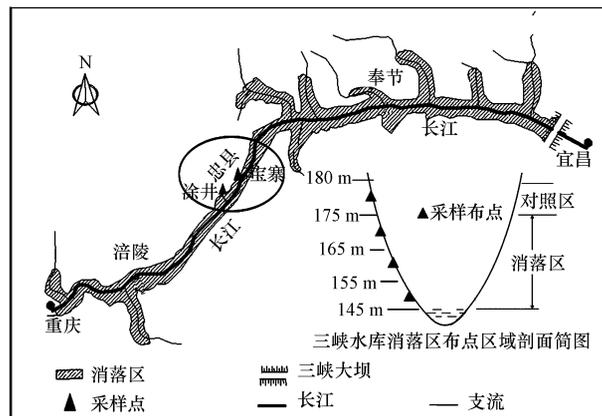


图1 三峡水库消落区布点区域简图

Fig.1 Profile of sampling locations in the water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir

表1 三峡库区 2011 年水位、土温变化及采样区段

Table 1 The change of water level, soil temperature and sampling sites in Three Gorges Reservoir in 2011

采样时间	1月	3月	5月	7月	9月	11月
水位/m	173.69	165.10	155.36	146.59	157.48	174.32
土温/℃	7	10	20	37	28	18
采样区段/m	>175	165—175 >175	155—165 165—175 >175	145—155 155—165 165—175 >175	155—165 165—175	>175

2 结果与讨论

2.1 土壤全氮、全磷含量的变化特征

2.1.1 不同高程土壤全氮、全磷随时间的变化特征

不同月份中旬干、支流采样点消落区土壤全氮含量见图 2(a,b).干流石宝寨点对照区(>175 m/未淹区)土壤全氮年均含量为 $0.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其在 3 月含量最高,达 $1.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;消落区(145—175 m)年均含量稍高于对照区,为 $0.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,165—175 m、155—165 m 区含量均表现为 7 月最高,9 月最低,且在 7 月出露的 145—155 m 区含量也较高.随海拔升高,消落区各区段 7 月含量分别是对照区的 1.84、1.39 与 1.80 倍.支流涂井点对照区土壤全氮年均含量与干流石宝寨点相近,为 $0.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;消落区年均含量也稍高于对照区,为 $0.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其 9 月中旬 155—165 m 及 165—175 m 区含量均高于石宝寨点对应区段,表明待水位上涨时,支流涂井点消落区土壤向水体释放氮的风险可能大于干流石宝寨点.7 月 145—155 m 区出露土壤全氮含量达 $1.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于其他区段相应月份,与干流石宝寨点特征相同,这可能是由于夏季库区水位下降至 145 m 时,河道变窄,水体缓慢消退,6、7 月降雨引发的地表径流所携带的大量含氮污染物易停留在库岸,因此土壤氮含量较高.

不同月份中旬干、支流采样点消落区土壤全磷含量见图 2(c,d).石宝寨点对照区土壤全磷年均含量为 $0.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;消落区年均含量与对照区相近,为 $0.54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,165—175 m 区 3、5、7、9 月含量呈上升趋势,且 155—165 m 区中 9 月含量也较高.涂井点对照区土壤全磷年均含量为 $0.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,该区段的含量特征与石宝寨点相似,均表现为 3、5、7 月含量较低,说明干、支流采样点未淹区域的全磷含量随时间变化特征较一致;消落区年均含量稍高于对照区,为 $0.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,165—175 m 与 155—165 m 区 9 月含量比 5、7 月高,与石宝寨点的特征相似,说明暴露时间的延长利于全磷的积累.

2.1.2 落干期间对照区及消落区土壤全氮、全磷的月均含量变化比较

5、7、9 月落干期间石宝寨与涂井点出露土壤全氮及全磷的月均含量见表 2.石宝寨点与涂井点消落区 7 月全氮含量均分别高于同区域中 5、9 月的含量,且远高于相应月份对照区,水库夏季低水位运行

时,正值汛期,径流量大,人为活动及种植活动对地表径流影响显著,导致外源氮输入较大,且淹水后的土壤逐渐出露,其氧气含量增加,夏季温度上升,微生物活动迅速增强,利于氮素的累积,使得7月干支流采样点消落区土壤中全氮含量较高.而随着出露时间的增加,氮逐渐被植被利用,且部分氮素可能被冲刷到水体中,导致9月氮含量下降.干流石宝寨点消落区9月全氮含量比5月减少了36.11%,而支流消落区增加了44.44%,这与支流环境相对闭塞,成库后水流流速减缓,含氮污染物难以扩散有关,表明待水位上涨,支流涂井点水体富营养化风险大于干流石宝寨点.

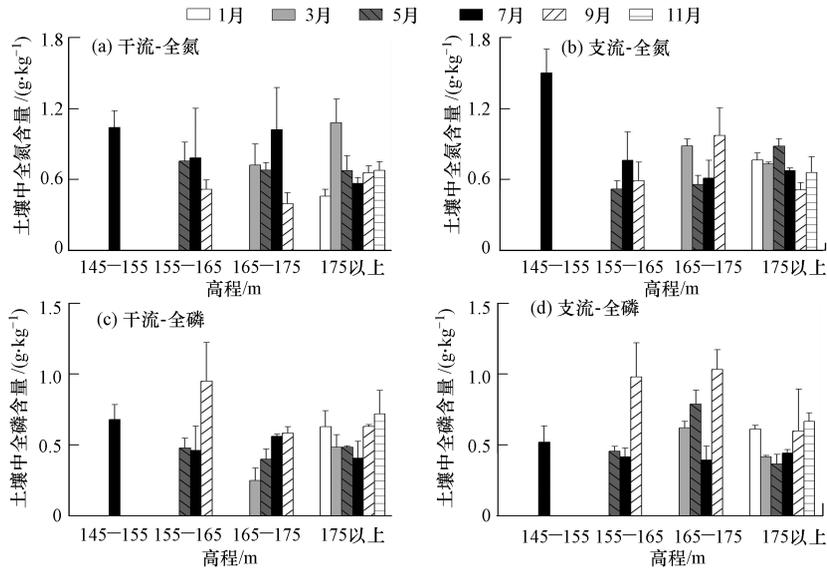


图2 不同高程出露土壤中全氮与全磷含量的时间变化特征

Fig.2 Time variations of soil total N and total P along with altitude

库区6、7月多暴雨,水土流失严重,磷素易随土壤侵蚀而流失,故干流石宝寨点与支流涂井点对照区及消落区土壤全磷含量未在7月表现出明显积累.7月中下旬开始出现高温伏旱天气,可能利于土壤母质的风化,干、支流采样点对照区及消落区9月全磷含量均升高,且消落区的累积量较对照区多.干支流采样点消落区9月全磷含量分别比相应区域5月增加了0.32、0.39 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明随暴露时间的延长,消落区全磷含量有积累的趋势.研究指出,消落区土壤的磷含量越高,对水体磷的吸附能力就越弱,而对水体释放磷的能力就越强^[9,15],且消落区土壤淹水后,几乎其中的养分含量均下降^[14].故随水位上升,库区消落区土壤中磷素有向水体释放的风险.

表2 5、7、9月土壤全氮、全磷月均含量

Table 2 Soil total N and total P content in May, July and September

流域	全氮含量/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$			全磷含量/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	5月	7月	9月	5月	7月	9月
干流 石宝寨消落区	0.72	0.95	0.46	0.44	0.57	0.76
石宝寨对照区	0.67	0.57	0.66	0.48	0.41	0.63
支流 涂井消落区	0.54	0.96	0.78	0.62	0.44	1.01
涂井对照区	0.88	0.67	0.51	0.36	0.44	0.60

2.2 土壤速效态氮、磷的含量变化特征

2.2.1 不同高程土壤速效态氮、磷含量随时间的变化特征

不同月份中旬干、支流采样点消落区土壤速效氮含量见图3(a、b).干流石宝寨点对照区土壤速效氮年均含量为 $39.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,3、5、7月含量逐步递减,与相应的全氮含量变化特征相一致,可能与春夏季植物生长消耗氮元素有关;消落区年均含量与对照区相近,为 $40.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.其中,165—175 m与155—165 m区9月含量均高于其他月份,而相应区域中9月全氮含量则低于其他月份,可见,土壤养分全量高,相对应的速效态含量未必高^[7].随海拔升高,消落区各区段的7月含量呈降低趋势,说明紫色

土小流域速效氮在雨季会随径流、泥沙迁移^[16],最后可能沉积在水体边.支流涂井点对照区土壤速效氮年均含量为 $35.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,稍低于石宝寨点相应区域,且其随时间变化特征不同于石宝寨点,主要表现为 5、7、9 月含量逐步降低,与涂井点区域中全氮含量特征一致;消落区年均含量为 $48.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,165—175 m 与 155—165 m 区含量随时间变化特征与相应区域的全氮含量变化相似,且 145—155 m 区全氮及速效氮含量均较高,说明支流涂井点消落区土壤中速效氮含量变化受其全氮含量的影响 ($P < 0.05$).因支流水体流速较干流缓慢,且涂井点环境相对闭塞,更易累积含氮污染物,故其 7 月 145—155 m 区土壤全氮及速效氮含量远高于干流石宝寨点相应区域.

不同月份中干支流采样点消落区土壤速效磷含量见图 3(c、d).干流石宝寨点对照区土壤速效磷年均含量为 $11.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 3 月含量最高,与相应区域的速效氮含量特征一致,与春播施用氮磷肥有关;消落区年均含量稍高于对照区,为 $14.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,165—175 m 与 155—165 m 区 7 月与 9 月含量均高于对照区相应月份,且 7 月出露的 145—155 m 区含量达到测定值的最大,说明在落干期间,石宝寨点消落区土壤易累积速效磷.支流涂井点土壤中速效磷含量整体低于干流,其对照区年均含量为 $6.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;消落区年均含量为 $7.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.干、支流采样点各区段中 5 月速效磷含量均较其他月份低.

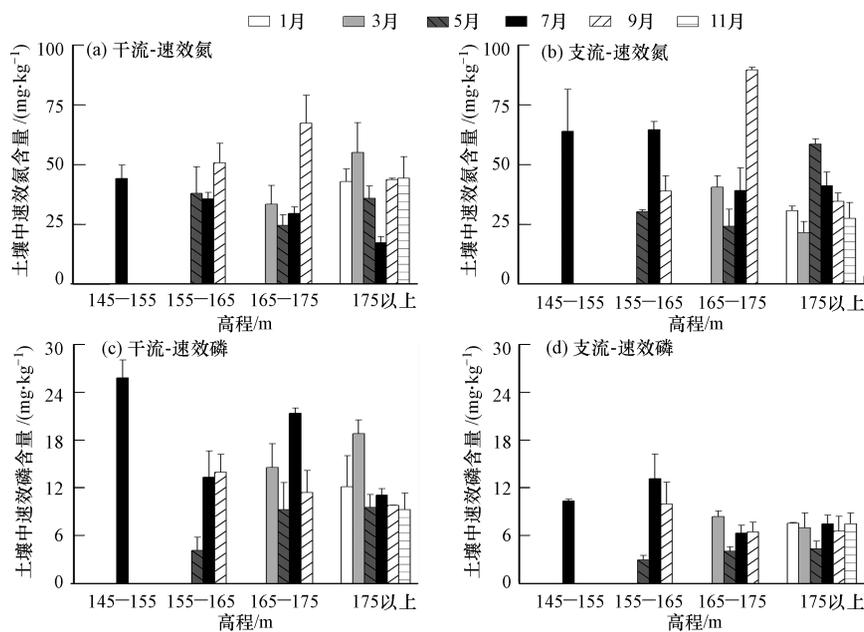


图 3 不同高程出露土壤中速效态氮、磷含量的时间变化特征

Fig.3 Time variations of soil available N and available P along with altitude

2.2.2 落干期间对照区及消落区土壤速效态氮、磷的月均含量变化比较

5、7、9 月落干期间石宝寨与涂井点出露土壤速效态氮、磷的月均含量见表 3.干流石宝寨点对照区中 7 月速效氮含量较低,而支流涂井点对照区 5、7、9 月速效氮含量呈下降趋势,均与相应的全氮含量呈显著相关 ($P < 0.05$).干、支流采样点消落区土壤速效氮含量均表现为 5 月 $<$ 7 月 $<$ 9 月,这可能与土壤出露,氧气含量增加,夏季温度逐渐上升,利于硝化细菌进行硝化活动,硝态氮含量增加有关^[17-18],说明随落干时间的延长,消落区土壤中速效氮有累积的风险,且在汛期时可能会向水体释放.石宝寨点与涂井点消落区土壤中 7 月速效氮含量分别比 5 月增加了 16.71%、105.55%,这与干支流消落区土壤全氮增加相关 ($P < 0.05$).

干流石宝寨点与支流涂井点区域 5、7、9 月土壤速效磷含量均表现为先升后降,且消落区的速效磷含量变化幅度大于对照区.干、支流采样点对照区 7 月速效磷含量分别是 5 月的 1.17、1.71 倍,而消落区的则分别是 3.01、2.87 倍,库区雨热同期,利于土壤中溶磷微生物分泌小分子有机酸或进行质子交换等^[19-21],以溶解难溶性无机磷酸盐,从而增加土壤速效态磷含量.干、支流采样点对照区 9 月速效磷含量分别比同区域的 5 月增加了 2.63%、50.11%,而消落区则分别增加了 89.54%、136.99%,说明采样点消落

区比对照区更易累积速效磷,且涂井点累积量大于石宝寨点,可见,水位涨落可间接改变土壤的性质.

表3 5、7、9月土壤速效态氮磷月均含量

Table 3 Soil available N and available P content in May, July and September

流域	速效氮含量/(mg·kg ⁻¹)			速效磷含量/(mg·kg ⁻¹)		
	5月	7月	9月	5月	7月	9月
干流 石宝寨消落区	31.24	36.46	59.06	6.69	20.15	12.68
石宝寨对照区	35.84	17.17	43.70	9.51	11.10	9.76
支流 涂井消落区	27.19	55.89	64.25	3.46	9.93	8.20
涂井对照区	58.58	41.06	34.62	4.35	7.45	6.53

2.3 库区土壤养分与各理化性质间的相关性分析

消落区土壤中养分输入包括化肥的施入、来自面源污染的地表径流输送、污水排放、生物来源、汛期时水体污染物的沉积等.输入的养分经过复杂的生物地球化学过程后吸附到土壤颗粒中,其含量变化及形态受土壤性质的影响,因此,分析土壤各养分之间及土壤理化性质之间的相关关系,有利于认识库区土壤养分的变化特征及其影响因素.库区采样点土壤养分与各理化性质间相关性结果见表4.

土壤中氮素主要以有机态形式存在,土壤氮的积累和消耗程度取决于有机质的积累和分解^[22-23],这与定量分析全氮、速效氮均与有机质存在显著($P<0.05$)相关的结果(表4)相吻合,表明有机质和氮具有大致相同的输入和输出途径.土壤有机质主要来源于植被凋落物、死地被物及土壤中小动物和微生物的排泄物、分解物和残体^[5].在三峡水库水位涨落过程中,凋落物、死地被物被水浸泡后很容易悬浮并随着水的流动离开土壤表面.故库区水位上涨时,土壤有机质的减少对土壤氮的积累将会产生直接影响.同时,常超等^[14]提出,土壤在周期性淹水-落干-淹水的过程中,不断的矿化作用与反硝化作用最终可能会导致土壤氮的大量流失.

土壤有机质分解产生的有机酸中氢离子的累积会使土壤偏微酸性^[24-25],由表4可知,土壤pH值与有机质、速效磷、水位高程都存在显著相关性.随水位高程的增加,pH值降低,其原因可能是有机质的分解产生有机酸,降低了土壤pH值,影响土壤有机质变化的各种因子都会间接地影响其pH值^[7].消落区水位高程越高,出露时间越长,植物生长状况越好,枯落物转化为有机质越多,导致消落区中水位高程越高的土壤,pH值越低.水位高程越低的土壤淹水时间越长,pH值则越高,从而减轻了酸对土壤母质的侵蚀风化,对土壤速效磷造成了显著影响.本研究中速效磷与水位高程呈显著负相关关系,水位高程低,淹水时间长,因而说明淹水能增加磷的有效性^[26],速效磷随淹水时间的延长而增加^[27].土壤氮、磷全量与其相应的速效态不存在显著相关性,可能与消落区季节性淹水有很大关系^[7].

表4 2011年库区各测定指标含量相关性分析

Table 4 Correlation of each index in 2011

指标	全氮	全磷	速效氮	速效磷	pH	有机质	水位高程
全氮	1	-0.037	0.141	0.258*	0.123	0.509**	0.123
全磷		1	0.288**	0.090	-0.005	-0.257*	0.142
速效氮			1	0.089	0.191	0.248*	-0.218*
速效磷				1	0.242*	0.149	-0.383**
pH					1	0.292**	-0.605**
有机质						1	0.194
水位高程							1

* $P<0.05$ 显著水平, ** $P<0.01$ 极显著水平.

3 结论

三峡库区雨热同期,消落区土壤易受降雨引发地表径流所携带的污染物等影响,且其氮、磷全量高,

相应速效态含量未必高.较于未淹区域,干流忠县石宝寨与支流涂井消落区土壤氮、磷含量在落干期间均表现出一定的积累,且涂井点的累积量明显高于石宝寨点,待水位上涨时,汝溪河的潜在富营养化风险更大.可见,水位大幅度消退,可间接影响库区消落区土壤原有的性质,利于土壤氮、磷的积累.因此,有关周期性淹水-退水特征的水库消落带土壤氮磷变化特征及其对水环境的影响值得关注.

参 考 文 献

- [1] 牛志明, 解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J]. 科技导报, 1998, 4(2): 61-62
- [2] 崔磊, 郝芳华, 许嘉琳, 等. 水库蓄水初期库底土壤对水质影响的模拟实验研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 39, (5): 688-693
- [3] 程瑞梅, 王晓荣, 肖文发, 等. 消落带研究进展[J]. 林业科学, 2010, 46(4): 111-119
- [4] Graf W L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers[J]. Geomorphology, 2006, 79(3): 336-360
- [5] 郭泉水, 康义, 赵玉娟, 等. 三峡库区消落带土壤氮磷钾, pH 值和有机质变化[J]. 林业科学, 2012, 48 (3): 7-10
- [6] 郭劲松, 贺阳, 付川, 等. 三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(003): 311-317
- [7] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带初期土壤养分特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29 (2): 281-289
- [8] 张彬, 陈猷鹏, 方芳, 等. 三峡库区淹没消落区土壤氮素形态及分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1126-1133
- [9] 马利民, 张明, 刘丛, 等. 外源磷对消落区土壤性质及磷释放的影响[J]. 环境化学, 2008, 27 (1): 73-76
- [10] 孙军益. 三峡库区紫色土氮磷淋溶试验研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2012
- [11] Battaglia L, Collins B. Linking hydroperiod and vegetation response in Carolina bay wetlands[J]. Plant Ecology, 2006, 184 (1): 173-185
- [12] Riis T, Hawes I. Effect of wave exposure on vegetation abundance, richness and depth distribution of shallow water plants in a New Zealand lake[J]. Freshwater Biology, 2003, 48 (1): 75-87
- [13] 黄轩民. 三峡水库消落带土壤碳氮磷分布及其交换通量研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2012
- [14] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26 (7): 1236-1244
- [15] 袁辉, 王里奥, 胡刚, 等. 三峡库区消落带受淹土壤氮和磷释放的模拟实验[J]. 环境科学研究, 2008, 21 (1): 103-106
- [16] 朱波, 汪涛, 徐泰平, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. 山地学报, 2006, 24 (5): 601-606
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [18] Qiu S, McComb A. Drying-induced stimulation of ammonium release and nitrification in reflooded lake sediment[J]. Marine and Freshwater Research, 1996, 47 (3): 531-536
- [19] Agnihotri V. Solubilization of insoluble phosphates by some soil fungi isolated from nursery seedbeds[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1970, 16 (9): 877-880
- [20] Illmer P, Barbato A, Schinner F. Solubilization of hardly-soluble $AlPO_4$ with P-solubilizing microorganisms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27 (3): 265-270
- [21] 吴海燕. 黑土磷素有效性的微生物调控技术及其机理研究[D]. 吉林: 吉林农业大学博士学位论文, 2012
- [22] 朱晓芳, 关雪晴, 付晶莹. 庐山土壤全氮含量及其影响因素初探[J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (16): 6868-6869
- [23] Decau M, Simon J, Jacquet A. Nitrate leaching under grassland as affected by mineral nitrogen fertilization and cattle urine[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33 (2): 637-644
- [24] Paul K, Black A, Conyers M. Effect of plant residue return on the development of surface soil pH gradients[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 33 (1): 75-82
- [25] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模, 等. 石灰岩荒山造林后土壤养分与活性碳含量的变化[J]. 林业科学, 2007, 43: (A01): 39-42
- [26] Gale P, Reddy K, Graetz D. Phosphorus retention by wetland soils used for treated wastewater disposal[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23, (2): 370-377
- [27] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J]. 土壤肥料, 2004, (1): 40-42