邹 翠,王尘辰,赵 洋,等.城市化和不同水位高程对三峡库区消落带土壤氮磷的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3832-3842.
Zou C, Wang C C, Zhao Y, et al. Effects of urbanization and water level elevation on soil nitrogen and phosphorus in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3832-3842.

城市化和不同水位高程对三峡库区消落带土壤氮磷的影响

邹 翠[1],王尘辰[2],赵 洋[1],刘语盈[1],赵小军[1],朱广宇[1*] (1.重庆大学,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045；2.重庆市农业科学院,重庆 401329)

摘要：以重庆大都市区不同城市化区域和水位高程的消落带土壤为研究对象,通过团聚体湿筛、选择性提取、回归分析、结构方程模型构建等技术方法,探讨城市化和水位高程下铁锰矿物和团聚体组成及稳定性对消落带氮磷的影响.结果表明,不同形态铁、锰含量在不同城市化和水位高程上均无显著性差异,消落带土壤主要以游离态氧化铁和无定形态氧化锰为主;团聚体组成及稳定性在不同城市化和水位高程上有显著差异,大团聚体(>2mm)和团聚体稳定性随水位高程增加而增加,粉黏粒(<0.053mm)反之,在 165m 的海拔上,区县大团聚体含量和团聚体稳定性显著高于主城;TN、TP 在不同城市化区域具有显著差异,表现为主城高于区县,且主城的 TN、AN、AP 随团聚体稳定性增加而增加,区县 TP 随团聚体稳定性增加而降低,TN、TP、AN 和 AP 的含量分别为(756.33±198.27)mg/kg, (399.97±108.25)mg/kg, (27.84±15.58)mg/kg 和(15.03±11.15)mg/kg;结构方程表明,土壤 pH 值主要通过影响铁锰矿物形态和团聚体稳定性调控消落带氮磷释放.总体而言,主城的氮磷污染风险比区县大,但在水位高程上均无显著差异,土壤团聚体稳定和铁、锰氧化物能有效固定氮磷,减少水环境的污染风险.

关键词：消落带；城市化；土壤团聚体；土壤铁锰；土壤氮磷
中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3832-11

Effects of urbanization and water level elevation on soil nitrogen and phosphorus in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area.

ZOU Cui[1], WANG Chen-chen[2], ZHAO Yang[1], LIU Yu-ying[1], ZHAO Xiao-jun[1], ZHU Guang-yu[1*] (1.Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China；2.Research Institute of Agricultural Engineering, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3832~3842

Abstract：This study analyzed the soils from riparian zones with different water level elevations in the Chongqing metropolitan area. The effects of soil Fe/Mn minerals and aggregate composition/stability on nitrogen and phosphorus under different urbanization levels and water level elevations were investigated by methods including wet sieving of aggregates, selective extraction, regression analysis and structural equation modeling. The results showed that no significant differences in iron and manganese speciation across urbanization or water level elevation gradients, with the riparian soils mainly composed of free iron oxide and amorphous manganese oxide. The composition and stability of soil aggregates exhibited significant differences across different urbanization and water level elevation gradients. The >2mm aggregates and aggregate stability increased with increasing water level elevation, while the <0.053mm aggregates exhibited an inverse relationship. At 165m water level elevation, county areas exhibited higher proportions of the >2mm aggregates and greater aggregate stability compared to the metropolitan core. TN and TP were significantly varied in different urbanized areas, with higher levels observed in the metropolitan core compared to county areas. TN, AN and AP increased with the increase of aggregate stability in the metropolitan core, whereas TP decreased with the increase of aggregate stability in the county areas. The content of TN, TP, AN and AP were (756.33±198.27)mg/kg, (399.97±108.25)mg/kg, (27.84±15.58)mg/kg and (15.03±11.15)mg/kg, respectively. The structural equation modeling results showed that soil pH regulated nitrogen and phosphorus dynamics in the riparian zone mainly by influencing the speciation of Fe, Mn minerals and the stability of the aggregates. In conclusion, the risks of nitrogen and phosphorus pollution in the metropolitan core are higher than that in the county areas, whereas water level elevation exhibited no significant impact on the pollution across the study area. Stabilized soil aggregates and Fe, Mn oxides can effectively immobilize nitrogen and phosphorus, thereby mitigating water pollution risks.

Key words：water level fluctuation zone；urbanization；soil aggregates；soil iron and manganese；soil nitrogen and phosphorus

通常,城市扩张导致的土地覆盖变化会增加硝酸盐的输出量[1].研究发现,城市流域内总氮、氮氧化物和总磷的含量随着城市发展增加,而有机碳和氨

收稿日期：2024-11-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42407618)
* 责任作者, 讲师, zhu.guangyu@cqu.edu.cn

氮的浓度下降[2].城市化导致的面源污染通过地表径流、土壤侵蚀、大气沉降等方式进入水体[3-4].库区作为多种生态系统聚集区域,是城市面源污染的“汇”[5].然而,目前针对城市化对流域的影响研究大多集中在单一生态系统上,未能充分讨论城市化背景下库区生态系统的响应模式,特别是水文变化下污染物的行为特征及其对库区环境的影响.

大坝水库人工水位调节导致库区形成长期反季节性干湿交替的消落区,对生态系统物质和能量的迁移转化产生重大影响[6].水库运行产生的频繁洪水会削弱土壤保留养分的能力,并通过硝化-反硝化耦合过程促进土壤中氮的释放[7].土壤氮的流失直接降低了植物生产力和作物产量,并显著增加了水体的富营养化和温室气体的排放[8].此外,研究表明,反复干湿交替的条件改变了土壤总磷含量并增加了有效磷的含量,这为植被提供养分但也增加了流失的风险[9].水位波动还会通过影响土壤氧化还原状态、pH 值等环境条件来改变金属矿物的发生形式和溶解过程[10].铁、锰矿物在迁移转化过程中能够与氮磷组分发生沉淀反应或吸附固定土壤中的氮磷,影响其形态和生物有效性[11-12].铁、锰元素也是构成团聚体的主要组成部分,并通过影响团聚体的结构和表面特性,间接调控氮磷的生态功能.反复干湿交替会导致土壤团聚体结构被破坏,释放出与土壤基质结合的氮磷,进而影响到土壤养分的储存和水体的富营养化[9,13].当前的研究集中于水位波动对消落带土壤性质的影响,关于消落带区域水位高程和城市化耦合对污染物迁移转化的影响研究较少.

三峡库区消落带位于长江流域生态屏障的咽喉地带,消落带的土壤环境因水位变化及人类活动等因素发生复杂变化,对氮磷的输送和转移模式产生了持续的关键影响[6-7].三峡库区重庆段包括 9 个主城区和 12 个区县,面积占整个库区面积的 85% [14].随着重庆主城区城镇化和工业化进程的加快,氮磷等污染物入库负荷快速增加,消落带地区生态质量较差.相比之下,区县土地利用程度较低、植被覆盖较好,土地生态质量较高[15-16].近年来,有学者探究消落带氮磷的释放和转化及其对生态环境的影响,随着多种植被恢复措施的开展,生境条件得到了改善[17-18].但是城市发展与环境保护之间仍存在冲突,氮磷污染仍是库区生态环境的主要问题[19].

不同城市化发展水平使面源污染强度存在显著差异,导致消落带汇集的污染物类型和浓度也存在显著的空间异质性[20].基于此,本研究以三峡库区消落带重庆段不同城市化区域不同水位高程的土壤为研究对象,研究城市化与水位高程对消落带土壤铁、锰氧化物、团聚体分布特征的影响,分析城市化与水位高程下消落带土壤氮磷的分布特征及影响因素,探究铁、锰氧化物、团聚体、氮磷相互关系,为理解消落带土壤中氮磷的动态变化提供参考.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

三峡库区(29°16′N~31°25′N,106°E~110°50′E)位于长江上游河谷地带.该地区以山地(占 74%)和丘陵(占 22%)为主,属于亚热带季风性湿润气候,四季分明,雨量充沛.年平均气温为 16~19℃,年平均降水量 1000~1800mm,其中全年 80%的降水发生在 4~10 月.三峡大坝建成之后,大坝上游形成了垂直高度 30m,长约 600km,最大面积 348.9km^2 的一段湿地生态系统和陆生生态系统交替演变的过渡地带,每年水库水位从夏季(5~9 月)145m 波动至冬季(10~次年 4 月)175m.

1.2　样品采集与处理

根据研究区城市化水平分布(表 1)及消落带水位高程变化特征,实验于 2022 年 5~8 月落干期,在三峡库区重庆段沿长江干流从下至上布置 6 个消落带采样点(图 1),每个采样点按间隔 10m 布置 3 个高程采样带(155, 165, 175m).具体采样点包括主城的 3 个地点:大渡口(29°23′N, 106°31′E)、渝中(29°34′N, 106°35′E)和江北(29°39′N, 106°53′E);区县的 3 个地点:长寿(29°48′N, 107°4′E)、涪陵(29°42′N, 107°24′E)和丰都(29°58′N, 107°49′E),以确保采样点的空间分布均衡性.为避免消落带植物生长的生命活动过程影响消落带土壤生境和微生物群落,于每个采样带采集 2 份土壤样品,1 份在约 2×2m 范围内用土钻随机采集 5 钻表层土壤(0~20cm),混合均匀,按四分法取适量装入聚乙烯自封袋中,每个样品 3 个重复,用于土壤理化性质测定;另一份采集 2 个原状土壤装入盒中,用于团聚体水稳性测定.新鲜土壤样品于当天运回实验室.将土壤样品沿自然结构轻轻剥成小

土块,置于室温下自然风干,用于水稳性团聚体测定.同时,去除土壤中植物残体、细根和石砾等杂质,风干后分别研磨过 100 目和 10 目筛,用于分析土壤理化性质及铁、锰矿物含量.

表 1 采样点城市化水平[21]

Table 1 Urbanization level of sampling points

采样点	人口密度 (人/km^2)	城镇化率 (%)	GDP (亿元)	农业与农村经济(亿元)
大渡口	3514.56	97.80	338.89	1.80
渝中	28782.61	100.00	1560.91	0.00
江北	4004.98	99.40	1602.76	1.84
长寿	601.69	71.27	918.63	98.27
涪陵	397.93	73.36	1504.37	139.58
丰都	204.45	51.03	391.17	86.90

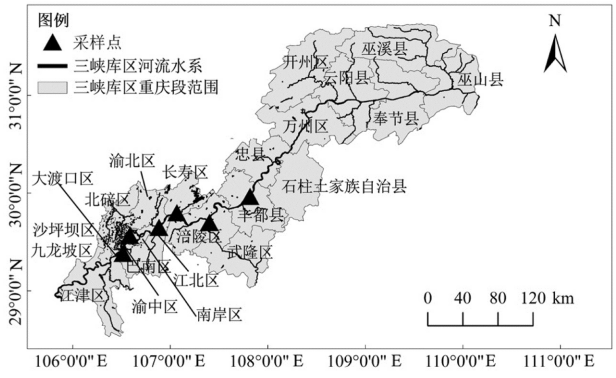


图 1 采样点位置分布

Fig.1 Distribution of the sampling points

1.3 样品分析

土壤容重(BD)采用环刀法测定;土壤含水率(SWC)参考 NY/T52−1987《土壤水分测定法》;土壤 pH 值采用电位法测定,土水比为 1:2.5(g/mL);阳离子交换量(CEC)采用三氯化六氨合钴浸提−分光光度法(HJ889−2017)测定;土壤样品总碳(SOC)、总氮(TN)含量使用元素分析仪(Elementa, Italy)测定,因土壤 pH 值为弱碱性,故进行酸洗去除无机碳预处理;总磷(TP)采用 H_2SO_4−H_2O_2 消煮法进行处理,经钼锑抗比色法测定;有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提−钼锑抗分光光度法测定;速效氮(AN)采用碱解扩散法测定.

选择性溶解提取法能针对不同化学结合态的铁、锰进行特异性提取.采用连二亚硫酸钠−盐酸(DH)试剂提取游离态铁、锰氧化物,相较于传统的连二亚硫酸钠−柠檬酸钠−碳酸氢钠(DCB)试剂进行提取不会引入新的碳源;采用盐酸羟胺(HH)试剂提取无定形态铁、锰氧化物,HH 是有效替代草酸铵的无机试剂;采用焦磷酸钠(PP)试剂提取有机金属络合态铁、锰氧化物强碱的 PP 试剂能与金属离子强烈结合,从而用于提取络合物中金属组分[22-23].上述提取方法需称取 0.5g 土壤样品 3 份,分别加入 30mL 浓度为 57.4mmol/L 的连二亚硫酸钠溶液(pH=3~4),0.25mol/L 的盐酸羟胺溶液(pH=3)和 0.1mol/L 的焦磷酸钠溶液(pH=10),振荡 16h 后以 5000r/min 的转速离心 1h,提取上清液并使用 0.22μm 的尼龙滤膜进行过滤.将上述 3 种提取剂的滤液进行 20 倍稀释后采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Genesis ICP−OES, Spectro analytical Instruments GmbH, Kleve, Germany)测定各形态铁、锰含量,铁的吸收波长为 238.204nm,锰的吸收波长为 257.610nm.

土壤团聚体采用干筛结合湿筛法测定水稳定性团聚体含量[24].干筛法:将风干的土壤团聚体置于套筛顶部,其孔径依次为 5, 2, 1, 0.5, 0.25mm.加盖后均匀摇晃套筛 5min,分离出>5, 2~5, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5 和<0.25mm 的土壤机械稳定性团聚体,称重并计算出各级团聚体所占百分比.湿筛法:依据干筛法所得的样品机械稳定性团聚体组成比例配制 50g 土样,置于孔径依次为 2, 1, 0.5, 0.25, 0.053mm 的套筛上,浸泡 10min,启动团聚体分析仪(XDB0601),以上下 3cm 振幅、30 次/min 的频率震荡 30min.分离出>2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, 0.053~0.25 和<0.053mm 的水稳性团聚体,在 60℃烘干称重后计算出各级团聚体所占百分比.每个样品测定 2 次.

根据湿筛法测定的水稳性团聚体组成结果,计算出>0.25mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体分形维数(D)等常用指标来表征团聚体稳定性,其中 $R_{0.25}$, MWD 和 GMD 越大,D 越小,表示土壤团聚度越高,团聚体稳定性越好[25-26].各指标计算公式如下,其中分形维数采用杨培岭等[27]推导的公式计算:

$$R_{0.25} = m_j / m \times 100\% \tag{1.1}$$

$$\mathrm{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot m_i}{m} \tag{1.2}$$

$$\mathrm{GMD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \cdot \ln X_i}{m}\right] \tag{1.3}$$

$$D = 3 - \frac{\lg\left(w_i / m\right)}{\lg\left(X_i / X_{\max}\right)} \tag{1.4}$$

式中:m_j 为>0.25mm 水稳定性大团聚体的风干质量,g; m 为样品总质量,g; X_i 为第 i 粒级的平均直径,mm; n 为筛子的数量;m_i 为第 i 粒级的团聚体重量,g;w_i 为直径小于 X_i 的累积重量,g; X_{max} 为最大粒级土粒平均直径,mm.其中计算分形维数(D)的临界粒径是 0.05mm,因此只考虑小于 0.05mm 的颗粒.

1.4　数据分析

利用方差分析检验土壤理化性质、团聚体及铁、锰在不同水位高程和不同采样地点之间的差异,然后用最小显著性差异(LSD)进行事后检验,显著性水平为 P<0.05;选择 Spearman 相关性分析对土壤理化性质、团聚体稳定性和各形态铁、锰之间相关性进行分析;利用线性回归量化团聚体对氮磷的影响;基于现有研究基础,结合相关性分析和回归分析的结果,选择 pH 值、CEC、铁、锰氧化物、团聚体稳定性、SOC 为自变量, TN、AN、 TP、AP 为因变量,构建结构方程模型,通过极大似然估计法对模型参数进行估计,并依据模型拟合指数(chisq、df、gfi、rmsea、srmr)对模型进行优化,以获得最佳拟合模型,量化各变量间的直接和间接影响关系.采用 R4.2.3 对数据进行统计分析并制图.

2　结果与分析

2.1　三峡库区城市化和不同水位高程对土壤氮磷影响

如图 2 所示,消落带土壤 TN 含量为(756.33±198.27)mg/kg, TP 含量为(399.97±108.25)mg/kg, AN 含量为(27.84±15.58) mg/kg, AP 含量为(15.03±11.15)mg/kg. K−W 检验的结果表明,各指标分不同高程的不同区域上基本无显著性差异.整体上,Wilcoxon 检验的结果表明,主城的 TN 和 TP 显著高于区县(P<0.05).在主城和区县上各指标的含量分别为: TN(831.04±201.61), (665.52±159.05)mg/kg; TP (436.53±76.54), (338.60±112.63)mg/kg; AN(29.98±17.23), (33.13±25.94)mg/kg; AP(15.96±11.36), (14.11±11.19)mg/kg.

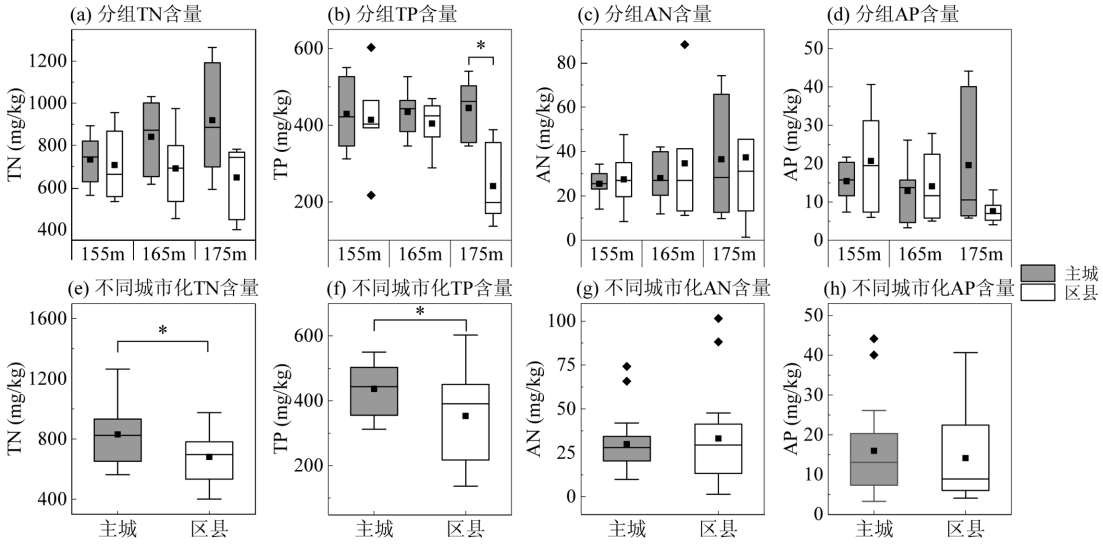


图 2　三峡库区消落带土壤氮磷分布特征

Fig.2　Distribution of TN, TP, AN and AP in the hydro−fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

*表示显著性差异 P<0.05

如表 2 所示,消落带土壤 pH 值为(8.19±0.42),表现为弱碱性; BD 为(1.40±0.15)g/cm^3,土壤整体上相对密实; SWC 为(21.22%±10.60%),区县的含水率显著高于主城,且均随高程增加而显著减少(P<0.05); CEC 为(7.88±5.09)cmol$^+$/L,土壤具有一定的肥力和养分保持能力,但变异性较大;土壤总有机质 SOM 为(30.13±11.97)mg/g. pH 值、BD、CEC 和 SOM 在不同区域上均无显著性差异.主城和区县理化性质分别为:pH(8.15±0.47), (8.22±0.38); BD (1.38±0.18), (1.41±0.10)g/cm^3; SWC(15.90%±10.14%), (26.55%±8.28%); CEC(8.28±5.95), (7.49± 4.20)cmol$^+$/L; SOM (30.54±12.50), (29.72±11.77) mg/g.

表 2 三峡库区消落带土壤理化性质分布特征

Table 2 Distribution of soil physicochemical properties in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

采样点	区域	pH 值	容重 BD(g/cm^3)	含水率 SWC(%)	阳离子交换量 CEC (cmol$^+$/L)	土壤有机质 SOM (mg/g)
155m	主城	8.16±0.30	1.38±0.14	28.35±6.14	7.07±3.72	26.95±8.69
	区县	8.09±0.35	1.38±0.03	34.05±2.86	5.92±2.85	29.70±11.33
165m	主城	8.28±0.43	1.39±0.28	11.73±2.96b	7.15±4.54	29.77±13.15
	区县	8.39±0.39	1.36±0.01	26.02±9.65a	6.87±5.06	27.83±11.32
175m	主城	8.01±0.67	1.38±0.17	7.62±3.74b	10.62±8.72	34.92±15.61
	区县	8.18±0.39	1.49±0.15	19.57±2.38a	9.68±4.13	31.62±14.35
整体	主城	8.15±0.47	1.38±0.18	15.90±10.14b	8.28±5.95	30.54±12.50
	区县	8.22±0.38	1.41±0.10	26.55±8.28a	7.49±4.20	29.72±11.77

注:小写字母表示不同位置的显著性差异, P<0.05.

2.2 三峡库区城市化和不同水位高程对土壤铁、锰氧化物的影响

如图 3 所示,方差分析表明不同形态铁、锰含量存在显著差异(P<0.05),铁含量表现为 DH>HH>PP,锰含量表现为 HH>DH>PP.DH、PP 和 HH 所提取的铁含量分别为(6.74±2.01),(0.78±0.31) 和(0.08±0.03) mg/g;提取的锰含量分别为(0.15±0.09),(0.33±0.14)和(0.02±0.01)mg/g.以上结果表明游离态氧化铁和无定形态氧化锰在三峡库区消落带土壤中占主要地位.3 种提取剂提取的铁、锰含量在不同高程及整体区域上均无显著性差异,在主城和区县提取的铁总量分别为(8.13±2.01)和(7.83±2.48)mg/g;提取的锰总量分别为(0.50±0.15)和(0.55±0.26)mg/g.

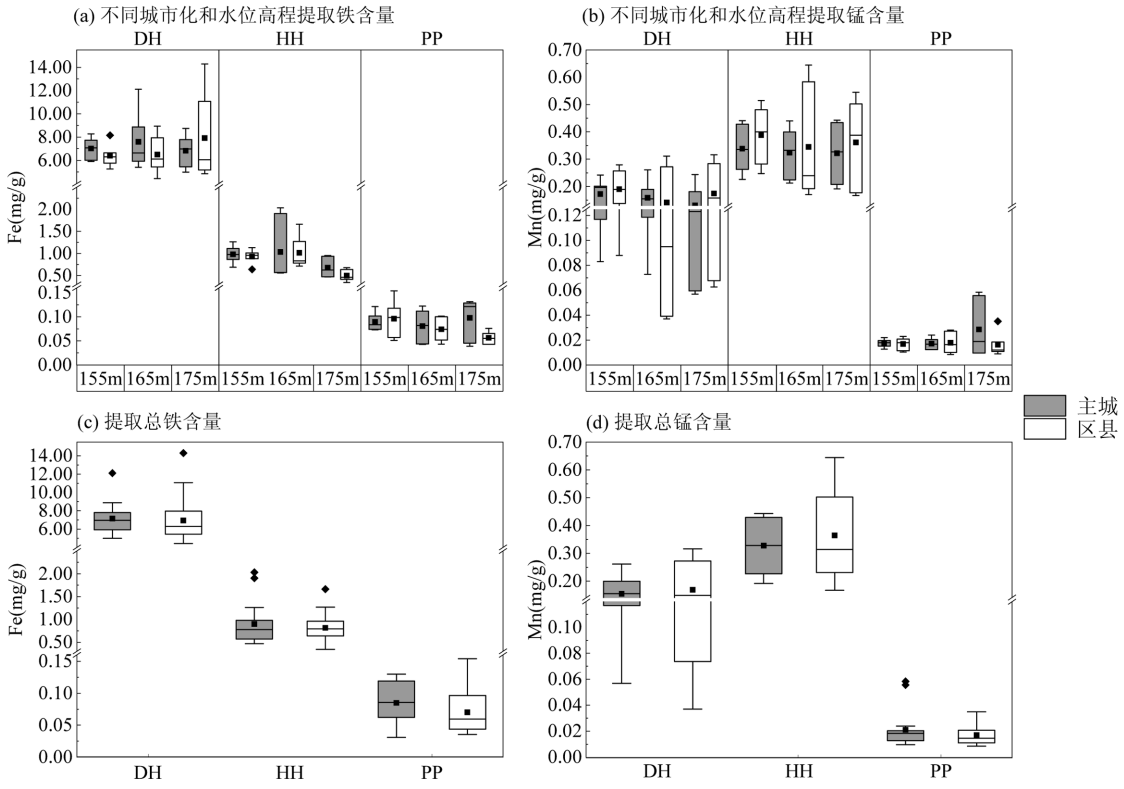


图 3 三峡库区消落带土壤铁、锰氧化物不同形态分布特征

Fig.3 Distribution of iron and manganese oxides in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

2.3 三峡库区城市化和不同水位高程对土壤团聚体组成及其稳定性影响

通过湿筛,将团聚体分级为大团聚体(>0.25mm),小团聚体(0.25~2mm),微团聚体(0.053~0.25mm)和粉黏粒组分(<0.053mm).如表 3 所示,方差分析表明三峡库区消落带土壤团聚体各粒径之间存在显著

差异(P<0.05),表现为小团聚体>粉黏粒≈微团聚体>大团聚体(统计学上无显著性的事后成对平均值比较用≈表示),其占总量的比值分别为(23.91%~62.24%), (3.08%~62.15%), (4.56%~62.01%) 和(0.12%~65.66%),均值为 40.55%, 26.86%, 21.95%和10.64%.三峡库区消落带土壤团聚体粒径组成以小团聚体(0.25~2mm)为主.在 165m 的海拔上,大团聚体含量表现出区县显著高于主城(P<0.05).整体在不同区域上无显著性差异,主城和区县消落带土壤团聚体各粒径占总量的比值分别为:大团聚体(0.12%~65.66%), (0.14%~51.49%); 小团聚体(23.91%~62.24%), (26.04%~61.52%); 微团聚体(4.56%~34.93%), (8.05%~62.01%);粉黏粒(3.08%~62.15%), (5.80%~38.36%),其均值为:大团聚体 7.40%, 13.86%; 小团聚体 42.16%, 38.94%;微团聚体 18.48%, 25.41%; 粉黏粒 31.96%, 21.76%.团聚体粒径在不同水位高程上存在显著性差异,表现为大团聚体随水位高程的增加显著增加,而粉黏粒随之显著降低(P<0.05).

如表 3 所示,土壤团聚体稳定性指标中 $R_{0.25}$ 介于(24.71%~92.36%), MWD 介于(0.27~2.54), GMD 介于(0.12~1.79), D 介于(3.00~3.02),均值分别为 51.19%, 0.72, 0.37, 3.01.在 165m 的海拔上,MWD、GMD 表现出区县显著高于主城(P<0.05).整体在不同区域上无显著性差异,主城和区县消落带土壤团聚体稳定性: $R_{0.25}$ 为(24.71%~92.36%), (27.69%~ 84.67%); MWD 为(0.27~2.54),(0.27~2.12); GMD 为(0.12~1.79),(0.17~1.26); D 为(3.00~3.02), (3.01~3.02),其均值:$R_{0.25}$ 为 49.56%, 52.83%; MWD 为 0.61, 0.82; GMD 为 0.33, 0.41; D 为 3.01, 3.01,消落带区县段团聚体结构较主城段更稳定.团聚体稳定性在消落带不同水位高程上存在显著性差异(P<0.05),其中 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 随水位高程的增加显著增加,D 反之(P<0.05).

表 3　三峡库区消落带土壤团聚体粒径及稳定性分布特征

Table 3　Distribution of soil aggregate size and stability in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

采样点	区域	>2mm	0.25~2mm	0.053~0.25mm	<0.053mm	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D
155m	主城	2.06±1.91	45.94±8.62	20.04±2.09	31.95±10.84	48.00±10.43	0.45±0.12	0.24±0.07	3.01±0.00
	区县	1.07±0.81	44.75±9.82	24.43±10.16	29.75±7.08	45.82±10.20	0.39±0.08	0.22±0.04	3.01±0.00
165m	主城	3.28±6.45b	38.75±9.99	20.03±9.78	37.94±17.62	42.03±14.10	0.43±0.26b	0.21±0.10b	3.01±0.00
	区县	16.10±7.66a	32.97±6.35	24.75±12.48	26.18±11.21	49.07±2.44	0.84±0.24a	0.31±0.04a	3.01±0.00
175m	主城	16.86±24.44	41.79±14.08	15.38±8.80	25.98±19.98	58.65±22.94	0.95±0.82	0.55±0.63	3.01±0.01
	区县	24.49±20.60b	39.10±10.64a	27.05±26.87	9.36±2.84b	63.59±27.46	1.24±0.78a	0.70±0.42a	3.01±0.00
整体	主城	7.40±15.38	42.16±10.89	18.48±7.57	31.96±16.39a	49.56±17.18	0.61±0.53	0.33±0.38	3.01±0.00
	区县	13.89±15.55	38.94±9.90	25.41±17.03	21.76±11.74b	52.83±17.81	0.82±0.57	0.41±0.32	3.01±0.00

注:小写字母表示不同位置的显著性差异, P<0.05.

3　讨论

3.1　三峡库区消落带土壤铁、锰氧化物影响因素

选择性溶解提取法能基本反映土壤中特定金属相的存在状态[22].研究表明,三峡库区消落带土壤中游离态氧化铁含量最高,无定形态氧化锰含量最高(图 3).夏季落干期,土壤中氧化还原电位较高,铁容易以 Fe^{3+}形式存在,形成氧化铁或氢氧化铁的晶体结构,并且在中性至碱性环境中,铁的溶解度较低,这些晶体结构在土壤颗粒表面以固态形式沉积,形成游离态氧化铁[28].而锰在土壤中的行为与铁有所不同,锰氧化物具有较低结晶度,锰的氧化物和氢氧化物倾向于形成无定形态而非结晶态,因此在土壤中通常以无定形态存在[29-30].此外,主城城市化起步较早,发展过程中钢铁建材的大量使用、机械施工的频繁开展和航运交通的长期磨损,成为土壤中铁元素的重要输入源[31-32].而区县农业活动较高,各类粪便作为农业常用的有机肥料,富含锰元素,长期过量施加会导致土壤中锰元素的积累[23,33].但由于消落带成土母质相似, 其矿物组成和化学成分相近,且消落带具有一致的周期性干湿交替特征使土壤经历相似的氧化还原环境变化,普遍偏碱性的土壤环境使铁锰离子易形成沉淀或金属络合物,从而限制了铁、锰在不同区域土壤中的迁移与转化差异[34].同时,随着区县的快速发展、主城重工业向区县的疏散以及库区生态环境保护工作的推进,主城和区县的铁锰含量并未存在显著差异[35].

相关分析表明,游离态氧化铁、无定形态氧化锰

与 MWD、TN、AN、AP 呈显著正相关(表 4).氧化铁、锰是土壤中重要且常见的胶结物质,由于其高氧化电位和相对大的比表面积,对有机物具有极强的吸附能力,并且能够结合粘土矿物颗粒,将微小团聚体聚合成更复杂的结构,从而增强土壤稳定性[30,36].此外,铁、锰通常在土壤基质上形成结核,影响土壤中养分的转化与释放.铁、锰(氢)氧化物能够吸收并固定土壤中的磷,作为磷从陆地到水体的运输屏障[13].NH_4^+在铁、锰结核的形成过程中,可以吸附并固定在结核的粘土矿物夹层中,作为独立的氮汇[11].

表 4 三峡库区消落带土壤氮磷、团聚体、铁、锰的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of nitrogen, phosphorus, aggregate stability, iron and manganese in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

参数	项目	TP	AN	AP	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D	DH_Fe	HH_Mn
TN	相关系数	0.182	0.622***	0.491*	0.342*	0.355*	0.291	0.233	0.647***	0.656***
	主城	0.325	0.742***	0.366	0.207	0.292	0.220	−0.028	0.575*	0.591*
	区县	−0.165	0.582*	0.414	0.637**	0.595*	0.410	0.319	0.668**	0.787***
TP	相关系数		−0.070	0.163	−0.232	−0.250	−0.243	0.169	−0.140	−0.312
	主城		0.097	0.118	−0.136	−0.178	−0.135	−0.003	−0.205	−0.225
	区县		−0.234	0.173	−0.324	0.409	−0.331	0.330	−0.236	−0.404
AN	相关系数			0.487**	0.459**	0.463**	0.411*	−0.127	0.533***	0.596***
	主城			0.819***	0.396	0.476*	0.384	−0.130	0.769***	0.614**
	区县			0.146	0.502*	0.447	0.335	−0.043	0.357	0.507*
AP	相关系数				0.234	0.194	0.133	0.118	0.360*	0.393*
	主城				0.480*	0.447	0.422	−0.354	0.517*	0.340
	区县				0.011	−0.100	−0.193	0.488*	0.098	0.292
$R_{0.25}$	相关系数					0.883***	0.902***	−0.616***	0.436**	0.317
	主城					0.930***	0.988***	−0.903***	0.461	0.053
	区县					0.926***	0.868***	−0.325	0.554*	0.453
MWD	相关系数						0.933***	−0.482**	0.475**	0.388*
	主城						0.953***	−0.765***	0.521*	0.201
	区县						0.926***	−0.253	0.604**	0.523*
GMD	相关系数							−0.719***	0.435*	0.198
	主城							−0.884***	0.470	0.051
	区县							−0.498*	0.381	0.224
D	相关系数								0.087	0.248
	主城								−0.148	0.251
	区县								0.181	0.360
DH_Fe	相关系数									0.753***
	主城									0.723***
	区县									0.827***

注: *表示P<0.05, **表示P<0.01, ***表示P<0.001.

3.2 三峡库区消落带土壤团聚体组成及稳定性的影响及其对氮磷的影响

团聚体是土壤结构的基本单元,对结构稳定和肥力维持等土壤生态功能的可持续性至关重要[37].水力条件是导致团聚体分解的最重要因素之一,周期性水位涨落和反复干湿交替加速了团聚体的破碎,显著降低了团聚体的稳定性.大团聚体对此更为敏感,消落带低海拔地区淹水时间长、淹水深度增加,土壤受强烈水文压力导致大团聚体崩解,这也与粉黏粒的增加直接相关,因此三峡库区消落带海拔越低的位置团聚体稳定性越差(表 3)[38-39].此外,研究发现,在旱季,消落带上游优先沉积较粗颗粒,细颗粒被输送到下游,因此上游的稳定性较好[6,40].本研究区区县在主城的上游位置,且人类活动较少,区县的团聚体稳定性相对于主城较高(表 3).

回归分析的结果表明(图 4),在主城,土壤 TN、AN、AP 随团聚体稳定性增加显著增加,在区县,TP 随团聚体稳定性增加显著降低.主城地区通常经历了较高程度的城市化和工业化发展,工业活动和人

口密集程度更高,城市绿化、工业废水和生活污水等含有大量的氮磷物质,并且能源消耗和工业废气的增长加剧了氮沉降,这些导致消落带土壤引入额外的氮源,从而提高了 TN 和 AN 的含量[7,14,41].土壤团聚体在养分循环中起着重要作用,团聚体的破碎会加剧氮的流失,降低其有效性[42].反之,土壤团聚体越稳定,养分元素迁移率越低,这也促进了 AN、AP 的转化[33].此外,主城区有更完善的土壤保护措施,如绿化覆盖、固碳措施等,这有助于减少氮磷流失[18].区县地区更多地涉及农业活动,农业区的土壤可能因为长期过量施用磷肥而导致磷固定在土壤颗粒表面,特别是在高 pH 值的条件下,磷会与钙、镁等阳离子反应形成难溶性的磷酸盐,被固定在土壤中不随团聚体稳定性变化而发生改变[43-44].另外区县的含水率显著高于主城,利于植被吸收利用土壤养分,从而导致磷含量随之下降.

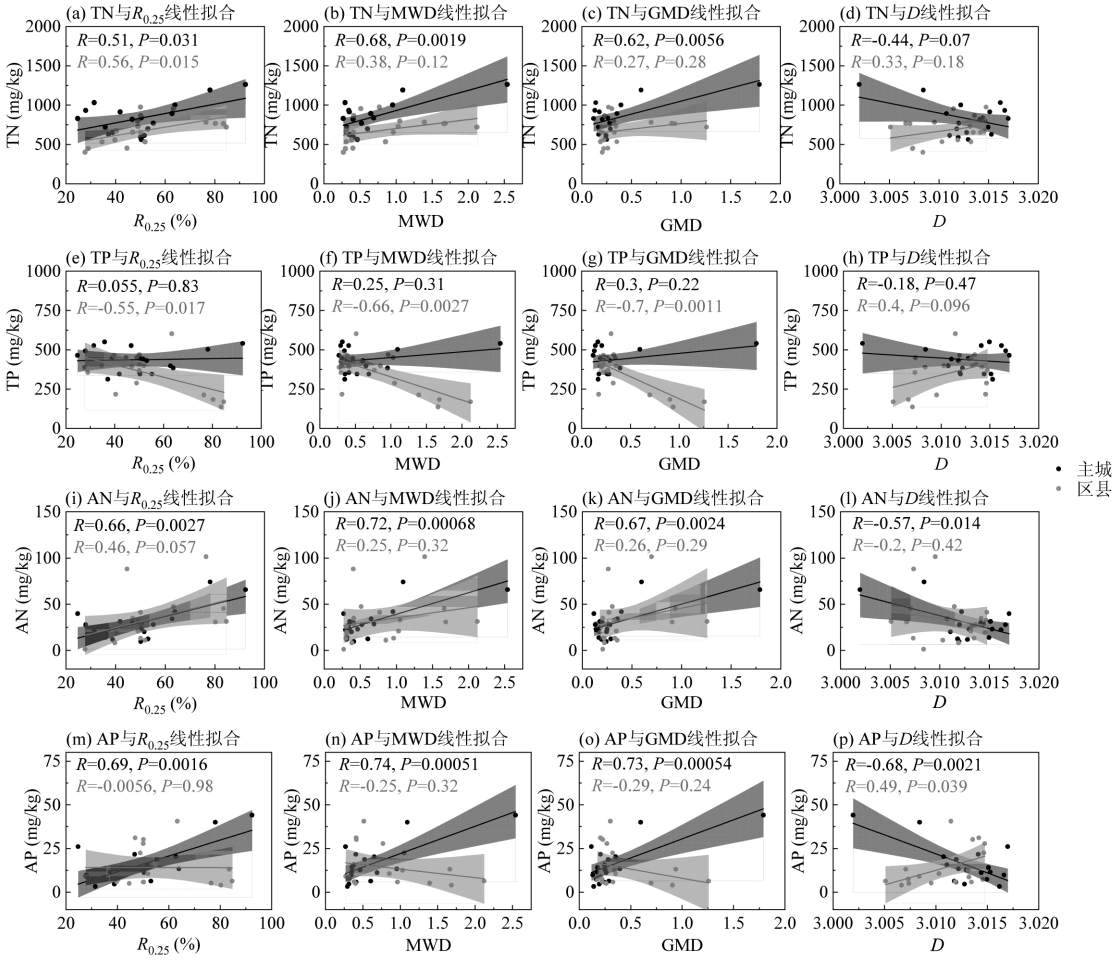


图 4　三峡库区消落带土壤氮磷与团聚体线性回归分析

Fig.4　Linear regression analysis of TN, TP, AN, AP and the aggregate stability in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

3.3　三峡库区消落带土壤氮磷影响因素

方差分析表明,TN 和 TP 在不同区域具有显著性差异(P<0.05),主要表现为主城>区县.随着三峡库区城市化进程的加快,库区城市生活污水排放量大大增加,同时由于区域内大量的农业面源以及污染严重的小企业的存在,造成三峡水库的氮磷等污染物入库负荷快速增加[4,7].主城区由于更高的城市化和工业化导致氮磷含量排放较高[14].另一方面,主城相较于区县位于下游地区,下游地区细颗粒物积累,细颗粒具有较高的养分吸收能力,有助于土壤中养分的积累[40].但也有研究指出,三峡库区消落带氮磷含量在大坝上游含量高,结果之间的差异可能是由于采样位置不同,这也意味着消落带土壤氮磷及其形态的变化是复杂的,并且可能受到土壤流失、植被

覆盖和人为活动等多种因素的控制[45].

结构方程模型的结果表明(图 5),铁、锰氧化物促进氮含量的积累路径不同,铁氧化物主要通过调控 SOM 来影响 TN(0.21),而锰氧化物主要通过 MWD (−0.35)间接影响 TN 和 AN; TP 和 AP 除了受到铁、锰间接调控 SOM 和 MWD 对其产生影响之外,还受到铁、锰的直接影响,pH 值是影响铁、锰氧化物的主要因素.此外, pH 值能直接影响或通过调控 CEC 和 SOM 间接影响氮磷.经过长期周期性水位波动,土壤中形成大量碱性还原性碳酸铁、锰,消落带土壤 pH 值逐渐升高,呈中性或偏碱性[46],这与 Wang 等[45]和 Shen 等[47]的研究一致.高 pH 值环境下,铁、锰等金属离子易与有机物结合或者形成难溶性(氢)氧化物,从而降低溶解度和迁移率.这也导致阳离子淋溶和浸出减少,CEC 值随之降低[23].土壤氮磷的溶解度和固定性也受到 pH 值的强烈影响,碱性条件下微生物活性高,加速有机质的分解,不利于氮磷的固定,同时碱性环境下植物生长好,对氮磷的吸收利用率高[7,44].粘土矿物和土壤有机质在创造稳定的土壤团聚体方面很重要,可以通过结合土壤颗粒形成更大的团聚体,这与目前的研究结果一致[33].但是无定形锰氧化物具有更高的高化学活性,容易与其他物质发生反应,从而影响团聚体的稳定性[29].总体而言,土壤团聚体和铁、锰氧化物对氮磷的固定具有促进作用.氮与有机质具有同样的消长趋势,研究发现有机氮是消落带土壤氮的主要存在形式[46].铁、锰能够通过结合有机质或改变土壤团聚体来固定氮或加速速效氮的吸收利用.铁与磷形成很强的表面络合物,扩散到微孔或形成颗粒聚集体,其相互作用是调节磷通量从土壤到水体的最重要机制之一[12].磷与氧化锰形成锰磷酸盐,锰的可用性会改变磷循环的轨迹,加速磷被植物吸收[33].氧化铁倾向于固定磷,而氧化锰则有助于磷的溶解和释放,因此在不同的土壤条件下,这两种氧化物对速效磷的影响会有所不同.土壤团聚体则主要是通过降低其迁移率,促进植物对养分的吸收利用.这对减少水体氮磷污染具有重要意义.

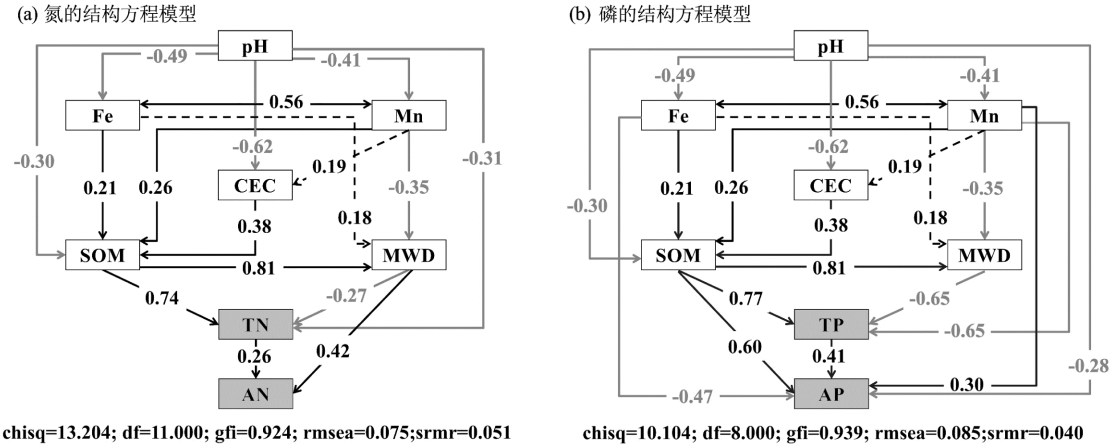


图 5 结构方程模型解释三峡库区消落带土壤氮磷影响机制

Fig.5 The structural equation model explains the influence mechanism of TN, TP, AN and AP in in the hydro−fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area

实线代表变量间关系显著, 虚线代表变量间关系不显著, 箭头上的数字为路径系数, 代表影响程度; chisq (χ2), df (自由度), gfi (拟合优度指数), rmsea (近似误差均方根), srmr (标准化均方残差根)

为降低消落带氮磷污染,实现三峡库区消落带的有效管理与生态保护,需重视对土壤生态环境的综合调控.一方面,可以通过增加植被覆盖、实施生态修复工程等方式提高土壤有机质含量,同时采取合理设置护坡、种植根系发达植物等工程措施,增强土壤团聚体稳定性.另一方面,鉴于城市化差异导致主城和区县氮磷含量变化及团聚体稳定性不同,应实施差异化管理策略.在城市化水平高的地区,加强污水和工业废水治理,严格控制氮磷排放;同时扩大城市绿化面积、推广生态种植,减少氮磷流失[2].在城市化水平低的地区,优化农业施肥方式,精准施肥,减少锰肥和氮磷在土壤中的积累[23];此外,合理规划农业种植,提高对土壤养分的吸收利用效率,以促进生态平衡.

4　结论

4.1　三峡库区消落带土壤不同形态铁、锰含量在不同城市化和水位高程上均无显著性差异; DH、PP 和 HH 提取的铁含量分别为(6.74±2.01), (0.78±0.31),(0.08±0.03)mg/g;提取的锰含量分别为(0.15±0.09),(0.33±0.14),(0.02±0.01) mg/g,铁锰形态主要以游离态氧化铁和无定形态氧化锰为主.

4.2　团聚体粒径和稳定性受水位高程影响较大, 主要表现为随高程增加而显著增加, 在 165m 海拔上, 区县的团聚体稳定性显著高于主城.

4.3　三峡库区消落带土壤 TN、TP、AN 和 AP 的含量分别为(756.33±198.27),(399.97±108.25), (27.84±15.58)和(15.03±11.15)mg/kg;主城的 TN、TP 显著高于区县,并且在主城 TN、AN、AP 随团聚体稳定性增加而增加,区县 TP 随团聚体稳定性增加而降低.

4.4　铁、锰直接影响或者通过调控 SOM、MWD 间接影响氮磷, pH 值是影响铁、锰的主要因素.

参考文献：

[1] Yifru B A, Chung I M, Kim M G, et al. Assessing the effect of urbanization on regional-scale surface water-groundwater interaction and nitrate transport [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):1-18.

[2] 郝　璐,孙　阁.城市化对流域生态水文过程的影响研究综述 [J]. 生态学报, 2021,41(1):13-26.
Hao L, Sun G. Impacts of urbanization on watershed ecohydrological processes: progresses and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(1):13-26.

[3] 周广强,谢　英,吴剑斌,等.基于 WRF-Chem 模式的华东区域 $PM_{2.5}$ 预报及偏差原因 [J]. 中国环境科学, 2016,36(8):2251-2259.
Zhou G Q, Xie Y, Wu J B, et al. Based on WRF-Chem model, the $PM_{2.5}$ forecast and deviation reason in East China region [J]. Chinese Environmental Science, 2016,36(8):2251-2259.

[4] 刘双爽,袁兴中,王晓锋,等.汉丰湖和高阳湖水体氮磷分布及影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(8):3749-3757.
Liu X S, Yuan X Z, Wang X F, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of nitrogen and phosphorus in water column of Hanfeng Lake and Gaoyang Lake. Chinese Environmental Science, 2021,41(8):3749-3757.

[5] Xue J, Wang Q, Zhang M. A review of non-point source water pollution modeling for the urban–rural transitional areas of China: Research status and prospect [J]. Science of The Total Environment, 2022,826.

[6] Qin D, Li S, Wang J, et al. Spatial variation of soil phosphorus in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir: Coupling effects of elevation and artificial restoration [J]. Sci Total Environ, 2023,905:167000.

[7] Nie B, Zeng Y, Niu L, et al. Long-term impacts of reservoir operation on the spatiotemporal variation in nitrogen forms in the post-Three Gorges Dam period (2004~2016) [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2021,28(46):65633-65643.

[8] Liu L, Zheng N, Yu Y, et al. Soil carbon and nitrogen cycles driven by iron redox: A review [J]. Sci Total Environ, 2024,918:170660.

[9] Qiu S, Wang Y, Wang J, et al. Effects of artificial vegetation restoration on the fractions and availability of soil phosphorus in the water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2023,24(4):1826-1837.

[10] Fan Z, Zhang C, Xu Y, et al. The influence of water level fluctuations on the migration and enrichment of phosphorus in an agricultural groundwater system, Jianghan Plain [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2023,30(8):21213-21224.

[11] 王　祎,黄来明.土壤中铁、锰结核微结构与组分研究进展 [J]. 土壤学报, 2023,60(2):317-331.
Wang Y, Huang L M. Research Progress on the Microstructure and Constituents of Fe-Mn Nodules in Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(2):317-331.

[12] Queiroz H M, Ferreira T O, Barcellos D, et al. From sinks to sources: The role of Fe oxyhydroxide transformations on phosphorus dynamics in estuarine soils [J]. J Environ Manage, 2021,278(Pt 2):111575.

[13] Huang L M. Pedogenic ferromanganese nodules and their impacts on nutrient cycles and heavy metal sequestration [J]. Earth-Science Reviews, 2022,232:104147.

[14] Yao Z H, Liu Z Z, Lei J S, et al. Identification and evaluation of water pollution risk in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area in China [J]. Sustainability, 2022,14(10):6245-6262.

[15] 马世五,谢德体,张孝成,等.三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征 [J]. 生态学报, 2018,38(23):8512-8525.
Ma S W, Xie D T, Zhang X C, et al. Spatiotemporal variation in the ecological status of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(23):8512-8525.

[16] 曹　伟,秦延文,马迎群,等.三峡库区重庆市内重点工业园区氮磷污水排放特征 [J]. 环境工程技术学报, 2018,8(6):617-626.
Cao W, Qin Y W, Ma Y Q, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus discharge of main industrial parks in Chongqing in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018,8(6):617-626.

[17] Hu J, Huang Y, Du J. The impact of urban development intensity on ecological carrying capacity: a case study of ecologically fragile areas [J]. Int J Environ Res Public Health, 2021,18(13):7094-7118.

[18] Shu X, Zhang K, Zhang Q, et al. Response of soil physico-chemical properties to restoration approaches and submergence in the water level fluctuation zone of the Danjiangkou Reservoir, China [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2017,145:119-125.

[19] Xue L, Hou P, Zhang Z, et al. Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,304-312.

[20] Gui H, Zhang C. Current situation and prospect of urban non-point source pollution research [J]. Advances in Environmental Protection, 2019,09(6):775-781.

[21] 重庆市统计局.重庆统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023:

27−230.
Chongqing Municipal Bureau of Statistics. Chongqing Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023:27−230.

[22] 李 一,林敦梅,魏 培,等.三峡库区马尾松林不同形态铁、铝矿物对土壤有机碳稳定的影响 [J/OL]. 中国环境科学, 2023:1−11.
Li Y, Lin D M, Wei P, et al. Effects of different forms of iron and aluminum minerals on soil organic carbon stabilization in *Pinus massoniana forest* in the Three Gorges Reservoir area [J/OL]. China Environmental Science, 2023:1−11.

[23] Anthonio C K, Jing H, Tianfu H, et al. Depth distribution of bulk and aggregate−associated manganese oxides mediated by soil chemical properties in a long−term fertilized paddy soil [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020,20(4):2631−2642.

[24] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate−size classes and aggregate−associated carbon [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(2):681−689.

[25] 江仁涛,李富程,沈淞涛.川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响 [J]. 水土保持研究, 2018,25(4):36−42.
Jiang R T, Li F T, Shen S T. Effects of degradation of alpine grassland on soil aggregates composition and stability in northwestern Sichuan province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(4):36−42.

[26] 李 娟,韩霁昌,陈 超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2017,31(1):248−53,59.
Li J, Han J C, Chen C, et al. Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly−gully region of loess plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,31(1): 248−53,59.

[27] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993,(20):1896−1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil represented by weight distribution of particle sizes [J]. Chinese Science Bulletin, 1993,(20):1896−1899.

[28] Liu X, Qin J, Yang J, et al. Response of soil iron oxides in freshwater marsh to different tidal hydrology in the Yellow River Estuary wetland, China [J]. Ecological Engineering, 2023,190.

[29] Grangeon S, Bataillard P, Coussy S. The nature of manganese oxides in soils and their role as scavengers of trace elements: implication for soil remediation [M]. Springer, Cham, 2020:399−429.

[30] Li H, Santos F, Butler K, et al. A critical review on the multiple roles of manganese in stabilizing and destabilizing soil organic matter [J]. Environ Sci Technol, 2021,55(18):12136−12152.

[31] Khurram D, Bao Y, Tang Q, et al. Sedimentary geochemistry mediated by a specific hydrological regime in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(14):40356−40374.

[32] Hogan D M, Walbridge M R. Recent land cover history and nutrient retention in riparian wetlands [J]. Environmental Management, 2009,44(1):62−72.

[33] Anthonio C K, Jing H, Jin C, et al. Impact of long−term fertilization on phosphorus fractions and manganese oxide with their interactions in paddy soil aggregates [J]. J Environ Manage, 2023,333:117440.

[34] Li Y Y, Gao B, Xu D Y, et al. Heavy metals in the water−level−fluctuation zone soil of the three Gorges Reservoir, China: Remobilization and catchment−wide transportation [J]. Journal of Hydrology, 2022,612:128108.

[35] Zhang S, Wang W, Wang F, et al. Temporal−spatial variations, source apportionment, and ecological risk of trace elements in sediments of water−level−fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,29(12):18282−18297.

[36] Zhang X, Liu X, Kong L, et al. Role of free iron oxides in the physicochemical and mechanical properties of natural clay [J]. Engineering Geology, 2022,303:106665.

[37] Nsabimana G, Bao Y, He X, et al. Impacts of water level fluctuations on soil aggregate stability in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Sustainability, 2020,12(21):9107−9126.

[38] Nsabimana G, Bao Y, He X, et al. Soil aggregate stability response to hydraulic conditions in water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Catena, 2021,204:105387.

[39] Sun X Z, Liu S, Tang H, et al. Effects of Water−Level Fluctuation on soil aggregates and aggregate−associated organic carbon in the Water−Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Land, 2024,13(3):313−328.

[40] Ye C, Chen C, Butler O M, et al. Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine years of operation of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Sci Total Environ, 2019,664:841−850.

[41] Liu F, Wang X, Chi Q, et al. Spatial variations in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus contents and controlling factors across the "Three Rivers" regions of southwest China [J]. Sci Total Environ, 2021,794:148795.

[42] Ding S J, Zhang X F, Yang W L, et al. Soil nutrients and aggregate composition of four soils with contrasting textures in a long−term experiment [J]. Eurasian Soil Science, 2021,54(11):1746−1755.

[43] Peng Y T, Zhang T T, Tang B B, et al. Interception of fertile soil phosphorus leaching with immobilization materials: Recent progresses, opportunities and challenges [J]. Chemosphere, 2022,308:136337.

[44] Wan H S, Zhang W C, Wu W, et al. Environmental factors affecting soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus under two cropping systems in the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Soils and Sediments, 2022,23(2):831−844.

[45] Wang C, Fang F, Yuan Z, et al. Spatial variations of soil phosphorus forms and the risks of phosphorus release in the water−level fluctuation zone in a tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. Sci Total Environ, 2020,699:134124.

[46] 简尊吉,裴顺祥,郭泉水,等.三峡水库峡谷地貌区消落带土壤氮磷钾、有机质含量和 pH 值的时空动态 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(9):2778−2786.
Jian Z J, Pei S X, Guo Q S, et al. Temporal and spatial dynamics of soil nitrogen,phosphorus,potassium,organic matter and pH in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28 (9):2778−2786.

[47] Shen Y F, Cheng R, Xiao W, et al. Temporal dynamics of soil nutrients in the riparian zone: Effects of water fluctuations after construction of the Three Gorges Dam [J]. Ecological Indicators, 2022,139:108865.

作者简介: 邹 翠(2000−),女,湖南衡阳人,重庆大学硕士研究生,主要从事生态修复及固碳效应研究.发表论文 1 篇.zoucui777@163.com.