

鄱阳湖枯水季湿地土壤碳氮磷生态 化学计量特征及其影响因素

邓通¹, 钱海燕¹, 周杨明², 谢冬明³

(1. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013; 2. 江西师范大学地理与环境学院,
南昌 330200; 3. 江西科技师范大学旅游学院, 南昌 330038)

摘要: [目的] 探讨湿地土壤营养元素生态化学计量特征及其影响机制有助于深入了解土壤养分循环过程及其内部驱动机制。[方法] 以江西鄱阳湖国家级自然保护区内蚌湖(半控湖)和泗洲头(开放水域)湿地为研究对象, 基于相关性分析和结构方程模型(structural equation model, SEM)研究 2017—2019 年表层土壤在不同水位高程梯度下碳、氮、磷生态化学计量特征及其关键影响因素。[结果] 蚌湖湿地土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)质量分数平均值(9.33、1.18、0.43 g/kg)显著高于泗洲头湿地 SOC、TN 和 TP 质量分数平均值(2.65、0.31、0.19 g/kg) ($p < 0.05$), 在相同水位高程梯度下均未随着年份变化而显著变化 ($p > 0.05$)。蚌湖湿地土壤 C:N 平均值(9.24)显著低于泗洲头湿地(10.19), 但 C:P、N:P 平均值(53.18、6.23)显著高于泗洲头湿地(40.90、4.05) ($p < 0.05$)。蚌湖和泗洲头湿地土壤 C:N 未受到水位高程梯度的显著影响 ($p > 0.05$), C:P 和 N:P 随着水位高程梯度的增加呈递增至递减的变化趋势, 且相同水位高程下蚌湖 C:P 随年份的变化发生显著变化 ($p < 0.05$)。蚌湖和泗洲头 C:P 和 N:P 均与地上生物量(AGB)、电导率(EC)呈显著正相关, 与 pH 呈显著负相关 ($p < 0.05$)。湿地土壤碱解氮(AN)、氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和 AGB 对蚌湖和泗洲头湿地土壤生态化学计量值产生直接影响, 同时蚌湖土壤生态化学计量值还受土壤体积质量(BD)和 pH 的直接影响, 泗洲头土壤生态化学计量值还受土壤水分体积分数(SWC)和 EC 的直接影响。蚌湖土壤中 AGB 为 C:N 的关键影响因子, AN 为 C:P 和 N:P 的关键影响因子; 泗洲头土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是 C:N 的主控因子, 同时 AGB 也是泗洲头湿地 C:P 和 N:P 的关键影响因子。[结论] 鄱阳湖湿地植被生物量和土壤氮素对土壤碳氮磷生态化学计量特征具有重要影响, 具有半控湖特征的蚌湖湿地土壤碳氮磷生态化学计量值主要受 AGB 和 AN 的影响, 而开放水域泗洲头主要受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AGB 的影响, 未来可考虑通过湿地植被恢复与重建技术模式促进鄱阳湖湿地生态恢复与保护。

关键词: 鄱阳湖湿地; 枯水季; 生态化学计量特征; 影响因素; 结构方程模型

中图分类号: X171.1; S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0279-10

Ecological Stoichiometric Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Poyang Lake Wetland during Dry Season and Their Influencing Factors

DENG Tong¹, QIAN Haiyan¹, ZHOU Yangming², XIE Dongming³

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330200, China; 3. School of Tourism,

Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China)

Abstract: [Objective] Investigating the ecological stoichiometry of soil nutrients and the driving mechanisms in wetlands can provide key insights into soil nutrient cycling processes and the internal driving factors. [Methods] This study focused on the wetlands of Banghu (semi-controlled lake) and Sizhoutou (open-water area) in the National

收稿日期: 2024-10-28

修回日期: 2024-12-09

录用日期: 2024-12-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-02-18

资助项目: 江西省自然科学基金面上项目(20212BAB203002); 国家自然科学基金项目(41561105); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK201909838); 江西省自然资源厅科技创新项目(ZRKJ20242616)

第一作者: 邓通(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事自然地理学研究。E-mail: deng1001001@163.com

通信作者: 钱海燕(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: hyqian@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Nature Reserve of Jiangxi Poyang Lake. Based on correlation analysis and structural equation modeling (SEM), the ecological stoichiometric characteristics of surface soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) and their key influencing factors under different elevation gradients from 2017 to 2019 were analyzed. [Results] The mean concentrations of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in the Banghu wetland (9.33, 1.18 and 0.43 g/kg, respectively) were significantly higher than those in the Sizhoutou wetland (2.65, 0.31 and 0.19 g/kg, respectively) ($p < 0.05$). At the same elevation gradient, SOC, TN, and TP concentrations in both wetlands did not vary significantly over the years ($p > 0.05$). Although the mean soil C:N ratio in the Banghu wetland (9.24) was significantly lower than that in the Sizhoutou wetland (10.19), the mean C:P and N:P ratios in the Banghu wetland (53.18 and 6.23, respectively) were significantly higher than those in the Sizhoutou wetland (40.90 and 4.05, respectively) ($p < 0.05$). Elevation gradient had no significant effect on the C:N ratio in either wetland ($p > 0.05$). However, C:P and N:P ratios exhibited an increasing - decreasing trend along the elevation gradient. At the same elevation, C:P in the Banghu wetland showed a significant interannual variation ($p < 0.05$), while there was no significant change observed in the Sizhoutou wetland ($p > 0.05$). Both wetlands exhibited significant positive correlations of C:P and N:P ratios with the aboveground biomass (AGB) and electrical conductivity (EC), and significant negative correlations with pH ($p < 0.05$). Soil alkaline nitrogen (AN), ammonium-nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), and AGB had direct effects on soil ecological stoichiometry of both wetlands. In addition, the ecological stoichiometric characteristics in the Banghu wetland were directly influenced by soil bulk density (BD) and pH, while those in the Sizhoutou wetland were influenced by soil volumetric water content (SWC) and EC. In the Banghu wetland, AGB was the key factor influencing C:N, while AN was the primary determinant of C:P and N:P. In the Sizhoutou wetland, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was the main controlling factor for C:N, and AGB was the critical factor affecting C:P and N:P. [Conclusion] Vegetation biomass and soil nitrogen play crucial roles in the ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in the Poyang Lake wetlands. The soil stoichiometric values in the semi-controlled Banghu wetland are primarily driven by AGB and AN, whereas those in the open-water Sizhoutou wetland are mainly influenced by $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and AGB. Therefore, technical model of vegetation restoration and reconstruction in wetlands could be considered to promote ecological restoration and protection of Poyang Lake wetland in the future.

Keywords: Poyang Lake wetland; dry season; ecological stoichiometric characteristics; influencing factors; structural equation model

Received: 2024-10-28

Revised: 2024-12-09

Accepted: 2024-12-17

Online(www.cnki.net): 2025-02-18

湿地生态系统碳(C)、氮(N)、磷(P)循环过程及其环境效应是湿地科学的研究热点。土壤C:N、C:P和N:P生态化学计量特征作为土壤养分组成和营养状况的重要指标,广泛应用于土壤内部养分循环与限制作用研究^[1]。土壤C:N是衡量土壤碳氮平衡状况的重要指标,也是N素矿化能力的标识^[2];土壤C:P是土壤有机质矿化释放P素或从外界吸收P素的重要指标^[3];土壤N:P是N养分和P养分饱和或限制的标志^[4]。探究湿地生态系统土壤C、N、P三者之间的生态化学计量特征,有助于深入了解土壤养分循环过程及其内部驱动机制,对认识湿地土壤营养元素有效性及其平衡过程、预测湿地未来变化方向等具有重要意义。关于湿地土壤C:N、C:P和N:P

分布格局及其驱动因素等方面的研究已有诸多成果,研究区域集中于河口湿地^[5]、滨海湿地^[6]和沼泽湿地^[7]等。然而,湿地土壤生态化学计量特征受到湿地水文、气候、土壤、植被等多种因素的综合影响,其分布格局与驱动因素具有复杂性。有研究^[8]表明,湿地C:N在水平空间上具有相似的变化趋势,但化学计量比的空间格局却存在较大差异。滨海湿地土壤C:P和N:P主要受盐分和pH的影响,淡水湿地C:P和N:P受水分体积分数影响较大^[9],但也有研究^[10]发现,滨海湿地C:N和N:P受黏粒质量分数调节,对pH变化不敏感。这些不一致的结论可能是由于土壤空间异质性所致,需要从时空尺度深入探讨湿地生态化学计量特征的分布格局及其驱动因素。

鄱阳湖位于江西省北部,是中国最大的淡水湖泊,为过水性、吞吐型、季节性湖泊,具有“高水是湖,低水似河”“洪水一片,枯水一线”的自然地理特征^[11]。鄱阳湖湿地是国际重要湿地之一,受鄱阳湖水文节律和气候条件影响,湿地景观类型复杂,土壤空间异质性明显^[12]。受水文干旱化和人为活动的影响,鄱阳湖极枯水位延长,植被呈现由湿生向旱生植被演替的趋势,导致湿地土壤碳、氮、磷营养元素间的生物地球化学循环与耦合过程变得更为复杂^[13]。已有研究^[14]表明,水位高程、景观类型、地上生物量等对鄱阳湖土壤计量具有显著影响,但众多学者分析时往往将土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)质量分数的影响程度算入其中,如付珊等^[15]研究表明,土壤C:N和C:P主要受SOC质量分数影响,TN为N:P变化的主要控制因素;徐晨瀛等^[16]研究发现,SOC、TN、TP、pH和土壤水分体积分数是影响鄱阳湖土壤碳氮磷化学计量变化的关键因子。碳氮磷计量值即由碳氮磷元素质量分数计算而来,如将其作为影响因子研究可能产生极大冗余并掩盖其余环境因子对计量值的影响。湿地土壤化学计量比研究多局限于短期的时间范围内^[17],而长时间范围内的研究可能揭示其动态变化趋势及其影响机制。前期针对单一年份内的鄱阳湖湿地土壤碳氮质量分数及其空间分布特征开展相关研究^[18-19],但未对湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征进行深入研究,也未探讨影响因子的影响路径与权重。因此,本研究以鄱阳湖季节性淹水湿地蚌湖和泗洲头为研究对象,结合3 a的土壤观测数据,综合运用多种统计学方法,研究鄱阳湖季节性淹水湿地土壤C、N、P元素生态化学计量特征及其影响因素,以期为鄱阳湖湿地生态保护和修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于以永修吴城为中心的江西鄱阳湖国家级自然保护区内的蚌湖和泗洲头湿地(28°22′~29°45′N,115°47′~116°45′E),属亚热带湿润季风型气候,具有鄱阳湖湿地典型的冬春寒、夏多雨、秋旱特征,年降水量超过1 640 mm,主要集中在4—6月。蚌湖是碟形湖泊,是鄱阳湖的内湖,枯水期水位受到人为的调控,为半控湖水域;泗洲头是洲滩前缘,是鄱阳湖外湖,为开放水域,水位主要受鄱阳湖水位变化的影响;蚌湖和泗洲头的湖底高程较低,高程在9.5 m以上(据星子水文站吴淞高程)。研究区植被种类丰富,由湖岸至湖底依次为狗牙根(*Cynodon dactylon*)群落、芦苇(*Phragmites*

australis)群落、南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)群落、灰化藁草(*Carex cinerascens*)群落、水田碎米荠(*Cardamine lyrata*)群落等^[20]。其中,假俭草(狗牙根)群落主要分布在15 m高程以上的草甸土带,南荻群落(芦苇群落)主要分布在14~15 m高程的草甸沼泽土带,灰化藁草群落主要分布在11~14 m高程以内的沼泽土带,水田碎米荠群落(藨草群落)主要分布在11 m高程以下的水下沉积物带^[18]。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品来源与采集 鄱阳湖每年11月后退水进入枯水季,1月左右洲滩水位降至最低,10 m以上洲滩普遍出露,一直到翌年3月后开始涨水进入丰水季。为准确反映不同水位高程梯度下的土壤特征,本研究分别于2017年、2018年和2019年1月(枯水季)进行湿地表层(0~20 cm)土壤样品采集(图1)。蚌湖和泗洲头湿地分别设置3条样带,每个样带至少间隔500 m以上,进行GPS定位,立桩固定。根据鄱阳湖湿地水位变化(年际极高水位和极低水位),在2种类型湿地每个样带内,从湖心到湖岸(10~17 m水位区间),以2 m落差按照等高程梯度划分4个水位高程梯度,分别为<11、11~13、13~15、>15 m。在每个水位高程梯度范围内,随机设置3个采样点,每个采样点范围约为20 m×20 m区域,记录采样点位置坐标。在每个采样点范围内,随机设置5个1 m×1 m的样方进行植被地上部分和表层(0~20 cm)土壤样品采集。将采集的5个样方的植被样品和经过剔除根系、凋落物后的土壤样品分别进行充分混合为1个植被样品和1份土壤样品,分别装入塑料袋带回实验室进行处理。3 a内均在同一样点周围附近进行重复采集土壤和植被样品。

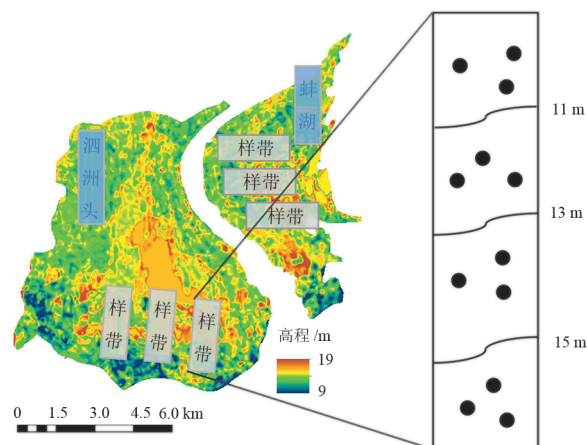


图1 研究区样点设置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the setting of sampling points in the research area

1.2.2 样品测定 植被样品主要测定地上生物量(AGB),土壤样品主要测定SOC、TN、TP、碱解氮(AN)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、速效磷(AP)、pH、电导率(EC)、土壤体积质量(BD)、土壤水分体积分数(SWC)、黏粒(Clay)、阳离子交换量(CEC)。其中,AGB测定主要采用烘干法,将所采植被样品带回实验室后挑除枯死植物,70℃烘干至恒重,计算其AGB。采用重铬酸钾外加热法测定SOC,凯氏定氮法测定TN,钼锑比色法测定TP,碱解扩散法测定AN,酚二磺酸比色法测定 NO_3^- -N,靛酚蓝比色法测定 NH_4^+ -N,碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定AP,电极电位法测定pH和EC,环刀法测定BD,烘干法测定SWC,湿筛法测定Clay质量分数,乙酸钠-火焰光度法测定CEC。上述测定方法见常规农业化学分析方法^[21]。

1.3 数据分析方法

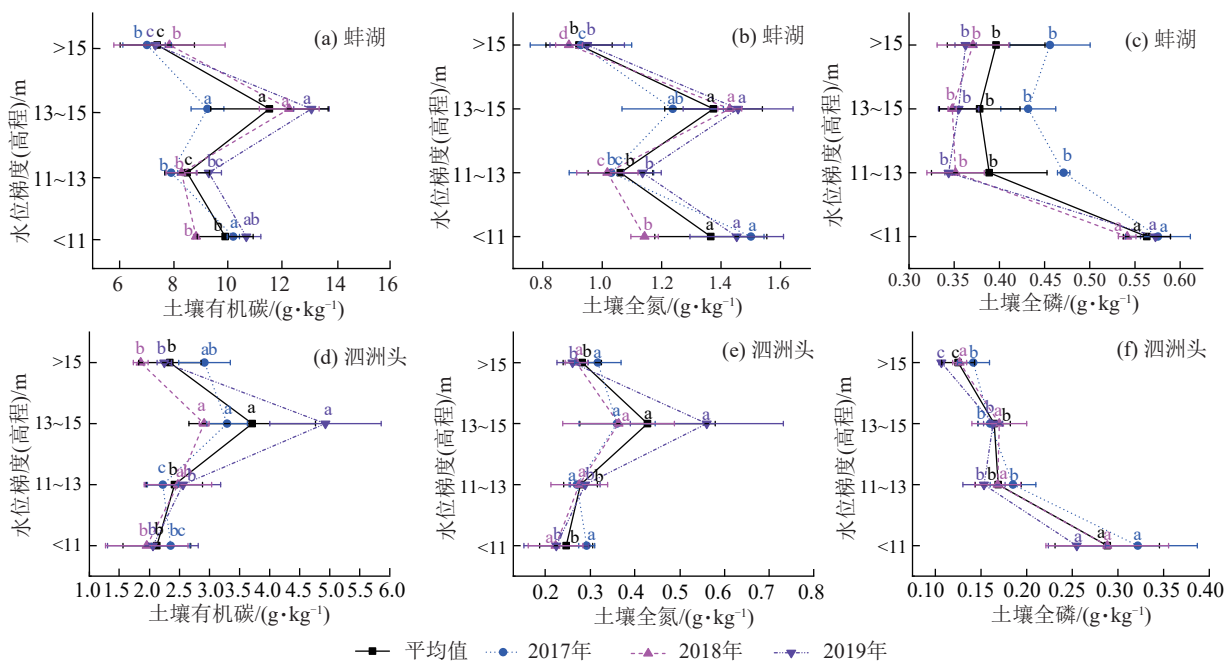
运用AMOS 24.0 软件建立结构方程模型(structural equation model, SEM),探究环境因子对C、N、P生态化学计量值的作用方式与影响路径;SEM结合了图形和数学表达,有利于定量分析和理解相对于统计方法的因果关系^[7]。利用SPSS

27.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)、Pearson 相关性分析和共线性诊断,因SOC、TN和TP对计量比的方差扩大因子(variance inflation factor, VIF)较大,因此本研究不考虑SOC、TN和TP对计量比的影响;显著性分析采用邓肯多重检验(duncan's multiple range test, DMRT)和独立样本T检验,数据以平均数±标准差表示,计量比为摩尔比。

2 结果与分析

2.1 湿地土壤碳、氮、磷分布

2017—2019 年,蚌湖和泗洲头湿地表层(0~20 cm)SOC 质量分数分别为 6.37~15.55、1.47~5.98 g/kg,平均值分别为(9.33±2.10)、(2.65±0.91)g/kg, TN 质量分数分别为 0.81~1.67、0.17~0.76 g/kg,平均值分别为(1.18±0.24)、(0.31±0.11)g/kg, TP 质量分数分别为 0.33~0.62、0.11~0.40 g/kg,平均值分别为(0.43±0.09)、(0.19±0.07)g/kg(图 2)。方差分析显示,蚌湖湿地土壤SOC、TN和TP均显著高于泗洲头湿地($p<0.05$),研究期间2种湿地类型SOC、TN和TP质量分数均未随着年份的变化而显著改变($p>0.05$)。



注:不同小写字母表示同一年份不同水位梯度下差异达显著水平($p<0.05$)。下同。

图 2 鄱阳湖枯水季湿地表层土壤不同高程下有机碳、全氮、全磷分布

Fig. 2 Distribution of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the surface soil of Poyang Lake wetlands at different elevations during the dry season

同一年份条件下,2种湿地SOC、TN最高值出现在13~15 m水位高程内,均显著高于11~13、>15 m水位高程($p<0.05$),但SOC和TN随着水位高程梯度的变化趋势具有不一致规律。其中,蚌湖湿地

SOC和TN随水位高程梯度增加呈先减、后增再减少的跳跃式变化,泗洲头SOC和TN则随水位高程梯度增加呈先减少后增加的变化趋势。2种湿地TP最高值均出现在<11 m水位高程内,显著高于其他水

位高程梯度 TP 值($p < 0.05$),均随高程梯度增加呈波动减少的变化趋势。

2.2 湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比

2017—2019 年,蚌湖和泗洲头湿地表层(0~20 cm)土壤 C:N 分别为 7.74~12.66、6.95~14.09,平均值分别为(9.24±0.97)、(10.19±1.63),C:P 分别为 33.23~111.92、14.53~96.38,平均值分别为(53.18±18.83)、(40.90±18.31),N:P 分别为

3.84~10.28、1.49~9.54,平均值分别为(6.23±1.58)、(4.05±1.76)。方差分析(图3)显示,蚌湖湿地土壤 C:N 显著高于泗洲头($p < 0.05$),泗洲头湿地土壤 C:P 和 N:P 显著高于蚌湖($p < 0.05$)。相同水位高程梯度下蚌湖和泗洲头湿地 C:N 和 N:P 未随着年份的变化而显著变化($p > 0.05$),蚌湖 C:P 在不同年份间具有显著差异($p < 0.05$),泗洲头则无显著变化($p > 0.05$)。

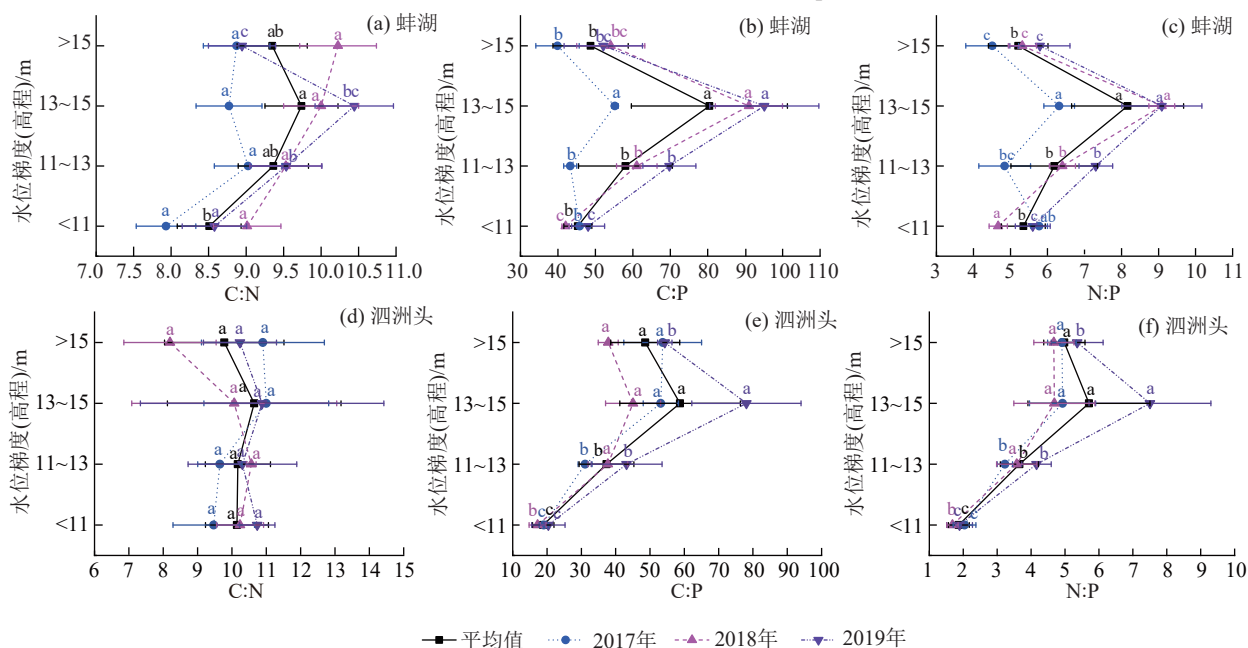


图3 鄱阳湖枯水季湿地土壤不同高程下碳、氮、磷生态化学计量值

Fig.3 Ecological stoichiometric values of soil carbon, nitrogen and phosphorus of Poyang Lake Wetlands at different elevations during the dry season

同一年份条件下,2种湿地土壤 C:N、C:P 和 N:P 最高值均出现在 13~15 m 水位高程内,C:N 值在不同水位高程下无显著差异($p > 0.05$),C:P 和 N:P 在 13~15 m 水位高程内显著高于 11~13、>15 m 水位高程($p < 0.05$)。2种湿地土壤 C:P 和 N:P 均随水位高程梯度增加呈先增加后减少的变化趋势。

2.3 湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征与环境因子的关系

Pearson 相关性分析(表1)表明,研究区2种类型湿地土壤 C:N 与 C:P 和 N:P 在不同环境因子间的相关系数强弱不一,但 C:P 和 N:P 与环境因子的相关性强弱趋势类似。蚌湖湿地土壤 C:N 与 AGB 呈显著正相关($p < 0.05$),泗洲头湿地土壤 C:N 与 AN 呈显著正相关($p < 0.05$),与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著负相关($p < 0.05$)。蚌湖和泗洲头土壤 C:P 和 N:P 均与 AGB 和 EC 呈显著正相关($p < 0.05$),与 pH 呈显著负相关($p < 0.05$),此外蚌湖 C:P 和 N:P 与 AN 呈显著正相

关($p < 0.05$),但泗洲头 C:P 和 N:P 与 AN 不具有显著相关性($p > 0.05$)。泗洲头 C:P 和 N:P 与 SWC 和 CEC 呈显著正相关($p < 0.05$),与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 AP 呈显著负相关($p < 0.05$)。

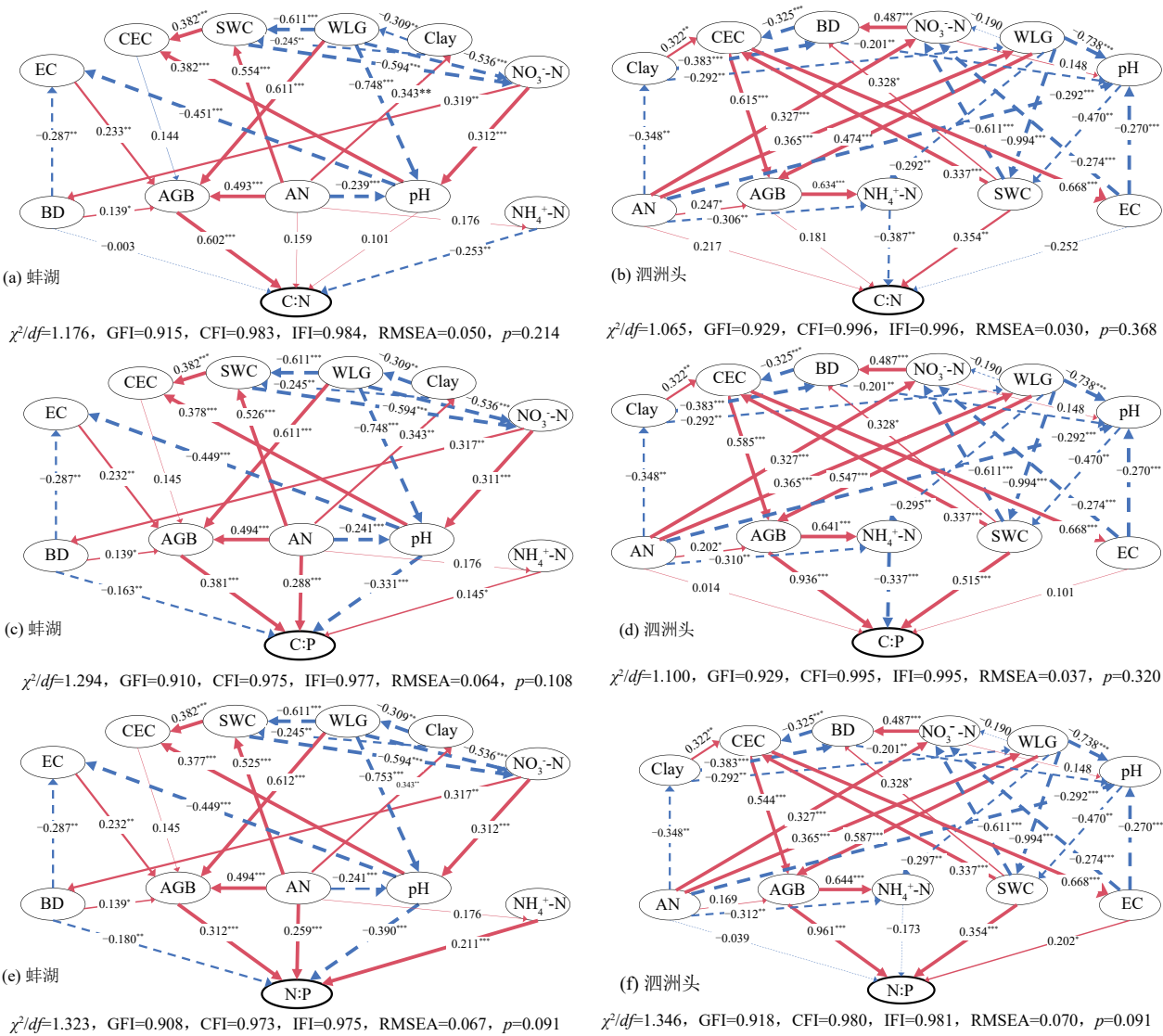
利用结构方程模型(SEM)量化各环境因子对碳氮磷生态化学计量值的作用方式和影响路径。模型优化过程中,AP 所在路径为不显著拟合关系($p > 0.05$),故将其从 SEM 模型中去除。结构方程模型(图4)显示,AGB、AN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对蚌湖和泗洲头湿地土壤生态化学计量值具有直接影响。蚌湖湿地土壤生态化学计量值还受 BD 和 pH 的直接影响,泗洲头湿地土壤生态化学计量值还受 SWC 和 EC 的直接影响。SEM 进一步表明,AGB 是蚌湖土壤 C:N 最重要的影响因子,其次为 AN 和 WLK;AN 为蚌湖湿地土壤 C:P 和 N:P 的主控因子,其次分别为 WLK 和 AGB 与 AGB 和 pH。相比之下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是泗洲头土壤 C:N 的主控因子,其次为 AN 和 SWC;AGB 为泗洲头湿地 C:P 和 N:P 的关键影响因子,其次为 SWC 和 CEC。

表 1 鄱阳湖枯水期湿地表层土壤碳氮磷计量值相关性分析

Table 1 Correlation analysis of the ecological stoichiometric values of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the surface soil of Poyang Lake wetlands during the dry season

湿地类型	生态化学 计量值	SWC	pH	WLG	AGB	BD	EC	CEC	Clay	AN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	AP
蚌湖 (半控湖)	C:N	0.052	-0.267	0.145	0.543**	0.039	0.137	-0.017	0.207	0.318	0.016	-0.163	-0.162
	C:P	0.036	-0.603**	0.265	0.725**	-0.134	0.394*	-0.169	0.162	0.495**	-0.147	0.261	-0.113
	N:P	0.025	-0.619**	0.266	0.685**	-0.159	0.421*	-0.168	0.107	0.452**	-0.177	0.321	-0.091
泗洲头 (开放 水域)	C:N	0.036	-0.065	-0.007	0.008	0.222	-0.251	-0.134	-0.150	0.336*	0.177	-0.330*	0.108
	C:P	0.384*	-0.437**	0.161	0.528**	-0.412*	0.533**	0.585**	0.324	0.187	-0.423*	0.097	-0.354*
	N:P	0.296	-0.463**	0.226	0.501**	-0.445**	0.574**	0.550**	0.324	0.087	-0.461**	0.192	-0.412*

注:*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$ 。



注:实线表示正向效应,虚线表示负向效应;*表示 $p<0.05$,**表示 $p<0.01$,***表示 $p<0.001$;线条不同粗细程度表示不同显著性程度。

图 4 环境因子对化学计量值影响的结构方程模型

Fig. 4 Structural equation model of the influence of environmental factors on the ecological stoichiometric values

3 讨论

3.1 鄱阳湖枯水季湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

土壤生态化学计量特征是反映土壤碳、氮、磷元

素矿化作用和平衡特征的重要指标。有研究^[22]表明,土壤C:N越低,土壤有机质分解速率越高,矿化水平越大,越有利于枯落物的分解。本研究中蚌湖和泗洲头湿地土壤C:N平均值低于全国土壤、全国

湿地土壤和众多湿地类型土壤(表 2),也低于同属于鄱阳湖的南矶山湿地土壤(12.60)^[15],可能与研究区土壤质地和有机质积累有关。泗洲头湿地土壤质地主要为粉黏土和砂壤土,其质地较细,分选性较差,枯水期时易被风蚀和搬运^[11],加之季节性淹水交替导致土壤团聚体破裂,增加有机质与外界的接触面积,加速 SOC 的淋失和破碎化;而蚌湖较高的黏粒含量虽对 SOC 具有一定物理保护作用,但蚌湖为过水性浅水湖泊,植被根系较浅、生物炭沉积较少,不利于 SOC 积累。本研究中鄱阳湖湿地 SOC 质量分数平均值为(5.99±3.73)g/kg 远低于七星河湿地(最

低 44.72 g/kg)^[2]和吉林东部山地沼泽湿地(最低 313.50 g/kg)^[23]等湿地,进一步证明研究区土壤有机质质量分数低,土壤养分贫瘠,加之 C:N 较低,有机质分解较快,导致鄱阳湖湿地碳矿化大于碳积累。因此,对鄱阳湖进行生态修复时应着力增强土壤固碳能力。有研究^[24]表明,土壤 C:N 低于 30 时硝酸盐的淋溶风险高,土壤 N 素流失风险大,本研究中湿地土壤 C:N 为 9.65,数值低于 30,同时全国土壤、全国湿地和全国众多湿地土壤 C:N 均低于 30,表明研究区与全国土壤和全国众多湿地土壤均存在较高的硝酸盐淋溶风险,土壤 N 素易流失。

表 2 全国土壤和全国不同湿地类型土壤碳氮磷生态化学计量比

Table 2 Ecstoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in national soils and soils of different wetland types across the country

类型	C:N	C:P	N:P	文献出处
全国土壤	11.90	61.00	5.20	TIAN 等 ^[25]
全国湿地土壤	18.22	245.22	13.60	张仲胜等 ^[26]
沼泽湿地(祁连山南麓沼泽湿地)	17.53	217.90	12.43	许泰等 ^[27]
滨海湿地(杭州湾滨海湿地)	5.93	8.92	2.36	李文琦等 ^[6]
河口湿地(黄河浮桥湿地)	11.88	49.12	4.52	王传盈等 ^[28]
东北平原湿地(三江平原湿地)	25.70	243.60	9.30	YING 等 ^[29]
湖泊湿地(鄱阳湖湿地)	9.65	46.57	4.94	本研究

土壤 C:P 是土壤 P 素矿化能力的反映,对土壤 C、P 平衡状况具有重要指示作用,是 P 有效性的一个重要指标^[3]。有研究^[7]表明,土壤 C:P 与有机质分解过程中释放的 AP 呈反比,C:P 越小,释放 AP 的可能性就越大。然而本研究中蚌湖湿地土壤 C:P 与 AP 关系不显著,与谢杨阳等^[30]的研究结果一致,但泗洲头湿地 C:P 与 AP 却呈显著负相关(表 1),可能是因为蚌湖为半控湖,在枯水期缺乏水体交换,水量主要受蒸发、蒸腾和渗流控制,枯水期时相对较弱的水交换能力抑制土壤微生物活性,降低有机态 P 转化为 AP 的能力,进而掩盖 TP 与 AP 的关系,相比之下泗洲头为开放水域,水位受鄱阳湖影响强烈,其水动力活跃且外源输入充足,有助于土壤中 AP 的重新分布,研究区低 C:P 加速有机态 P 的转化,从而产生泗洲头 C:P 与 AP 的显著负相关。本研究中鄱阳湖湿地土壤 C:P 在全国范围内处于较低水平(表 2),说明鄱阳湖湿地土壤 P 矿化速率较高,P 有效性较强,有利于土壤有机质的分解,从而补充土壤有效 P。

土壤 N:P 是 N、P 养分饱和或限制的标志,也可用来确定限制养分的阈值,同时还可指示土壤养分的供应情况^[25]。当 N:P<10 时,土壤养分受 N 素限制,当 N:P>20 时,土壤养分受 P 素限制;当 N:P 在 10~20 时,土壤养分受 N 素和 P 素共同限制^[31]。本研究中鄱阳湖湿地土壤 N:P 低于全国土壤、全国湿地

土壤、杭州湾滨海湿地和黄河浮桥湿地(表 2),数值低于 10,说明鄱阳湖湿地土壤在 N、P 矿化过程中,与 P 相比 N 相对匮乏,湿地土壤受到 N 限制,与诸多湿地土壤的研究^[25,32]结果一致。

蚌湖和泗洲头湿地土壤 C:N、C:P 和 N:P 均显著小于全国湿地平均水平(表 2),是鄱阳湖湿地土壤相对贫瘠所致。近年来,由于水文干旱化和人为活动影响,鄱阳湖沙地面积呈扩大趋势,不利于湿地 SOC 的积累。其次,虽然土壤 P 的来源主要为母质岩石的风化,受母质类型、土壤风化程度和风化速率等控制,土壤 P 素变化较小^[33],但蚌湖和泗洲头地处赣江和修水入河口附近,流域内生活污水和工农业废水等携带富 P 营养盐经赣江和修水汇入蚌湖和泗洲头,水体中的 P 盐在入湖区沉降蓄积,带来新的 P 源,进而导致低 C:P 和 N:P。本研究采样时间为鄱阳湖极枯季节,土壤微生物从厌氧呼吸转变为好氧呼吸,促进微生物的矿化分解,使得 N 和 P 元素有效性增强,降低 SOC 积累,导致低 C:N、C:P 和 N:P。

3.2 鄱阳湖湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响因素

本研究中 AN 是蚌湖 C:P 和 N:P 的关键影响因子,是因为 AN 是土壤肥力的直接贡献者,能增加供植被和微生物直接利用的氮素,有利于植被和微生物生长;蚌湖土壤以粉黏土为主,保水能力较强,氮素有

效性较高^[20],AN在C:P和N:P的变化中发挥显著作用;泗洲头的C:P和N:P与AN关系不显著(表1),可能是因为泗洲头较强的水文过程加速N素流失,降低AN的影响。泗洲头土壤以粉黏土和砂壤土为主,其较大的比表面积使 NH_4^+ -N更容易被土壤吸附,从而使 NH_4^+ -N成为C:N变化的主控因素^[11]。本研究发现,AGB是蚌湖C:N和泗洲头C:P及N:P的关键影响因子,同时AGB和WLG均与C:P和N:P呈显著负相关(表1),表明植物生长在碳氮磷计量值中具有重要作用。本研究还发现,WLG对蚌湖和泗洲头生态化学计量值无显著影响(表1),但SEM(图4)表明WLG通过直接影响AGB、SWC和pH等对计量值造成间接影响。由于鄱阳湖季节性淹水湿地中苔草、南荻、芦苇和狗牙根等优势植被呈带状分布,水位高程通过决定鄱阳湖植被分布的主要模式使不同水位高程梯度土壤养分发生差异,加之土壤碳氮磷具有一定的共性关系^[18],使得WLG主要通过调节植被和其他环境因子间接作用于计量值。本研究中泗洲头BD与C:P和N:P呈显著负相关,蚌湖BD与C:P和N:P关系不显著(表1),可能是因为泗洲头土壤质地以粉黏土和砂壤土为主,颗粒分布的差异可能增强土壤物理结构对养分分布和循环的影响,蚌湖的质地则以粉黏土为主,土壤粒度结构差异较小,养分迁移与转化受BD和Clay的影响较弱。pH与C:P和N:P呈极显著负相关,是因为土壤pH可以通过影响土壤微生物活性,进而影响土壤硝化和反硝化作用及氮素与磷素的固定和积累等过程^[34],从而对计量值产生直接影响。本研究中CEC只能通过影响EC或其他其余环境因子来对计量值产生间接影响(图4),可能是因为CEC是土壤盐度和可溶性离子的反应^[35],研究区鄱阳湖为湖泊淡水湿地,盐分相对咸水湿地较低,其影响程度相较pH、AN等更弱。

本研究2种湿地类型土壤生态化学计量值主要受氮素和植被生物量的影响,而土壤氮素主要来自植被分解和大气氮沉降,因此,对鄱阳湖进行生态修复时应重点关注植被的恢复与管理。近年来,受气候原因和人为活动的影响,鄱阳湖出露时间逐渐减少,淹没时间加长,由于土壤C:N偏低,土壤微生物活动较旺盛,鄱阳湖土壤有机碳矿化速率增强,碳积累减弱,进而使鄱阳湖湿地固碳能力减弱,而目前针对此方面研究还较少。因此,笔者未来研究将集中于鄱阳湖湿地土壤有机碳矿化和鄱阳湖土壤固碳能力方面,着力探究鄱阳湖湿地土壤在水文干旱化下有机碳矿化和碳库特征。

4 结 论

1)研究区蚌湖湿地土壤SOC、TN和TP平均值分别为 (9.33 ± 2.10) 、 (1.18 ± 0.24) 、 (0.43 ± 0.09) g/kg,泗洲头湿地土壤SOC、TN和TP平均值分别为 (2.65 ± 0.91) 、 (0.31 ± 0.11) 、 (0.19 ± 0.07) g/kg。蚌湖SOC、TN和TP均显著高于泗洲头($p < 0.05$),蚌湖TP在不同年份间具有显著差异($p < 0.05$)。

2)研究区土壤生态化学计量值C:N、C:P和N:P分别为 (9.65 ± 1.31) 、 (46.57 ± 16.19) 和 (4.94 ± 1.73) 。2017—2019年,2种湿地类型土壤C:N、C:P和N:P随年份变化保持稳定。从湖心到湖岸,蚌湖和泗洲头C:N、C:P和N:P最大值均集中于13~15 m水位高程,均随水位高程梯度增加呈递增至递减的变化趋势,其中C:N在不同水位上保持相对稳定,受水位高程变化影响较小。

3)土壤氮素和植被生物量对研究区土壤生态化学计量值具有突出影响,其中AGB和AN为蚌湖湿地计量值的关键影响因子, NH_4^+ -N和AGB为泗洲头湿地计量值的关键影响因子;BD、pH和EC对2种类型湿地土壤C:N、C:P和N:P造成直接影响,其余所选环境因子通过驱动上述因子对计量值产生间接影响。

参考文献:

- [1] DIBAR D T, ZHANG K, YUAN S Q, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in leaf, root, stem, and soil in four wetland plants communities in Shengjin Lake, China [J]. PLoS One, 2020, 15(8): e0230089.
- [2] HUANG J, YUAN Z N. Ecological stoichiometric characteristics of soil SOC, TN, and TP under different restoration methods in Qixing River wetland [J]. Journal of King Saud University-Science, 2021, 33(4): e101407.
- [3] 李梦天,秦燕燕,曹建军,等.青藏高原草地管理方式对土壤化学计量特征的影响[J].生态学杂志, 2018, 37(8): 2262-2268.
LI M T, QIN Y Y, CAO J J, et al. Effects of grassland management patterns on soil stoichiometry on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2262-2268.
- [4] 尧波,邹素珍,梁金凤,等.候鸟活动对鄱阳湖苔草湿地土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J].应用生态学报, 2024, 35(7): 1988-1996.
YAO B, ZOU S Z, LIANG J F, et al. Effects of migratory birds activities on the stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a *Carex*-dominated wetland of Poyang Lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,

- 2024, 35(7):1988-1996.
- [5] HU C, LI F, XIE Y H, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of three dominant plant communities distributed along a small-scale elevation gradient in the East Dongting Lake[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2018, 103:28-34.
- [6] 李文琦, 项琦, 解雪峰, 等. 互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5):2735-2745.
- LI W Q, XIANG Q, XIE X F, et al. Effect of *Spartina alterniflora* invasion on soil C:N:P stoichiometry in coastal wetland of Hangzhou Bay[J]. Environmental Science, 2023, 44(5):2735-2745.
- [7] WU G L, GAO J, LI H L, et al. Shifts in plant and soil C, N, and P concentrations and C:N:P stoichiometry associated with environmental factors in alpine marshy wetlands in West China[J]. Catena, 2023, 221: e106801.
- [8] 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2022, 43(6):3241-3252.
- SUN D B, LI Y Z, YU J B, et al. Spatial distribution and eco-stoichiometric characteristics of soil nutrient elements under different vegetation types in the Yellow River Delta wetland[J]. Environmental Science, 2022, 43(6):3241-3252.
- [9] LI D X, LI Y N, XIE Y L, et al. Effects of ecological restoration on soil biogenic elements and their ecological stoichiometry in the Yellow River Delta, China[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9:e993202.
- [10] MENG L, QU F Z, BI X L, et al. Elemental stoichiometry (C, N, P) of soil in the Yellow River Delta nature reserve: Understanding N and P status of soil in the coastal estuary[J]. Science of the Total Environment, 2021, 751:e141737.
- [11] 孙清凡, 钱海燕, 陈莎莎, 等. 鄱阳湖洲头湿地土壤粒度组成及其对有机碳的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1):197-204.
- SUN Q F, QIAN H Y, CHEN S S, et al. Composition of soil grain size and its effect on organic carbon in Sizhoutou wetland of Poyang Lake[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1):197-204.
- [12] 谢冬明, 周杨明, 钱海燕. 鄱阳湖湿地复合生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018:1-179.
- XIE D M, ZHOU Y M, QIAN H Y. Study on composite ecosystem of wetland in Poyang Lake[M]. Beijing: Science press, 2018:1-179.
- [13] 戴星照, 胡振鹏. 鄱阳湖资源与环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019:1-770.
- DAI X Z, HU Z P. Study on resources and environment of Poyang Lake[M]. Beijing: Science Press, 2019:1-770.
- [14] 雷学明, 段洪浪, 刘文飞, 等. 鄱阳湖湿地碟形湖泊沿高程梯度土壤养分及化学计量研究[J]. 土壤, 2017, 49(1):40-48.
- LEI X M, DUAN H L, LIU W F, et al. Soil nutrients and stoichiometry along elevation gradients in shallow-lakes of Poyang Lake wetland[J]. Soils, 2017, 49(1):40-48.
- [15] 付姗, 吴琴, 尧波, 等. 南矶湿地土壤碳、氮、磷化学计量比沿水位梯度的分布[J]. 湿地科学, 2015, 13(3):374-380.
- FU S, WU Q, YAO B, et al. Distribution of soil carbon-nitrogen, carbon-phosphorus and nitrogen-phosphorus ratios along water level gradient in Nanji wetlands[J]. Wetland Science, 2015, 13(3):374-380.
- [16] 徐晨瀛, 胡启武, 邹素珍, 等. 鄱阳湖湿地剖面土壤碳氮磷化学计量比沿高程梯度的变化特征[J]. 环境科学研究, 2024, 37(11):2514-2525.
- XU C Y, HU Q W, ZOU S Z, et al. Variation characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in soil profiles along elevation gradient in Poyang Lake wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(11):2514-2525.
- [17] WU Y H, WU Z J, JIANG S M, et al. Elemental stoichiometry (C, N, P) of soil in the wetland critical zone of Dongting Lake, China: Understanding soil C, N and P status at greater depth[J]. Sustainability, 2022, 14(14):8337-8350.
- [18] 钱海燕, 周杨明, 谢冬明, 等. 鄱阳湖季节性积水湿地表层土壤碳氮高程梯度分布特征及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(5):1199-1210.
- QIAN H Y, ZHOU Y M, XIE D M, et al. Distribution characteristics of surface soil carbon and nitrogen along with the elevation gradient and their influencing factors in seasonal waterlogged wetlands of Poyang Lake[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(5):1199-1210.
- [19] 谢冬明, 温丽, 易青, 等. 基于景观尺度下的鄱阳湖湿地浅层土有机碳的空间特征[J]. 生态科学, 2020, 39(1):101-109.
- XIE D M, WEN L, YI Q, et al. Spatial characteristic of SOC in surface soil in different landscape of Poyang Lake wetlands[J]. Ecological Science, 2020, 39(1):101-109.
- [20] 谢冬明, 黄庆华, 易青, 等. 鄱阳湖湿地洲滩植物梯度变化[J]. 生态学报, 2019, 39(11):4070-4079.
- XIE D M, HUANG Q H, YI Q, et al. Changes in floodplain vegetation in Poyang Lake wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11):4070-4079.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业

- 科学技术出版社, 2000: 1-638.
- LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 1-638.
- [22] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [23] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1160-1169.
- ZHANG Z S, LÜ X G, XUE Z S, et al. Is there a red-field-type C:N:P ratio in Chinese wetland soils? [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1160-1169.
- [24] 许泰, 鄂崇毅. 高寒沼泽草甸土壤养分特征及影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2023, 36(9): 2010-2018.
- XU T, E C Y. Nutrient characteristics and influencing factors in alpine swamp meadows soils [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(9): 2010-2018.
- [25] 王传盈, 王凯月, 王浩然, 等. 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1674-1683.
- WANG C Y, WANG K Y, WANG H R, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of typical wetland soils in the lower Yellow River [J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1674-1683.
- [26] LIU Y, JIANG M, LU X G, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents of wetland soils in relation to environment factors in Northeast China [J]. Wetlands, 2017, 37(1): 153-161.
- [27] 黄郡, 马瑞福, 崔守斌, 等. 不同恢复方式下七星河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2021, 44(6): 1227-1240.
- HUANG J, MA R F, CUI S B, et al. Soil C, N, and P concentrations and stoichiometry under different wetland restoration methods in Qixing River, Heilongjiang [J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2021, 44(6): 1227-1240.
- [28] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 994-1001.
- XIAO Y, SHANG L N, HUANG Z G, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(8): 994-1001.
- [29] 程瑞梅, 王娜, 肖文发, 等. 陆地生态系统生态化学计量学研究进展[J]. 林业科学, 2018, 54(7): 130-136.
- CHENG R M, WANG N, XIAO W F, et al. Advances in studies of ecological stoichiometry of terrestrial ecosystems [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(7): 130-136.
- [30] 谢杨阳, 刘旭阳, 金强, 等. 福州东湖湿地不同生境土壤碳氮磷及其生态化学计量比特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(4): 79-90.
- XIE Y Y, LIU X Y, JIN Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their ecological stoichiometric ratios in different habitats of East Lake Wetland, Fuzhou [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4): 79-90.
- [31] 罗丝琼, 郭其强, 盘金文, 等. 黔东南3种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 南方农业学报, 2022, 53(11): 3192-3200.
- LUO S Q, GUO Q Q, PAN J W, et al. Stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of three forest types in southeast of Guizhou Province [J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(11): 3192-3200.
- [32] 屈凡柱, 孟灵, 付战勇, 等. 不同生境条件下滨海芦苇湿地C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1731-1738.
- QU F Z, MENG L, FU Z Y, et al. The stoichiometry characterization of carbon, nitrogen and phosphorus in different reed-dominated coastal wetland habitats [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1731-1738.
- [33] CHEN Y H, HAN W X, TANG L Y, et al. Leaf nitrogen and phosphorus concentrations of woody plants differ in responses to climate, soil and plant growth form [J]. Ecography, 2013, 36(2): 178-184.
- [34] WU G, LIANG F, WU Q, et al. Soil pH differently affects N₂O emissions from soils amended with chemical fertilizer and manure by modifying nitrification and denitrification in wheat-maize rotation system [J]. Biology and Fertility of Soils, 2024, 60(1): 101-113.
- [35] 张光鑫, 王芳霞, 姚东东, 等. 环塔里木盆地红枣园土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国果树, 2024(3): 60-67.
- ZHANG G X, WANG F X, YAO D D, et al. C, N and P stoichiometric characteristics of jujube orchard soils in the ring Tarim basin [J]. China Fruits, 2024(3): 60-67.