DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2017.01.007

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①

雷学明[1,2]，段洪浪[1,2]，刘文飞[1,2]，纪宇铦[3]，周际海[1,2]，吴建平[1,2]，樊后保[1,2*]

(1 南昌工程学院生态与环境科学研究所，南昌 330099；2 江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室，南昌 330099；
3 福建师范大学地理科学学院，福州 350007)

摘 要：在鄱阳湖南矶山湿地自然保护区的碟形湖区，沿高程梯度采集岗地、高滩、低滩和泥沼土壤，对碳、氮、磷及其化学计量特征进行了研究。结果表明，表层土壤(0 ~ 10 cm)有机碳含量在岗地土壤最低；总氮和总磷含量均表现为岗地>高滩>低滩>泥沼，且总氮和总磷含量呈显著正相关。土壤有机碳和总氮含量均表现出随土层加深而减少的趋势。表层土壤 C/N、C/P 和 N/P 的平均值分别为 11.17、52.74 和 5.03，且随着高程梯度和湖泊的变化，C/N 保持相对稳定，而 C/P 和 N/P 的变化较大。铵态氮含量表现出岗地<高滩<低滩<泥沼，硝态氮含量表现出高滩<低滩<岗地<泥沼。有效磷与总磷含量呈极显著正相关。总之，受到鄱阳湖季节周期性水文变化的影响，研究区湿地土壤养分有较大差异，其中氮是 N/P 比的主要控制因子。

关键词：鄱阳湖；南矶山湿地；土壤养分；化学计量比；高程梯度；碟形湖

中图分类号：S151.9 文献标识码：A

湿地是陆地和水生生态系统之间的过渡带，是具有独特水文、土壤、植被和生物特征的生态系统，它承担着碳、氮、磷的源、汇和转化器等多项重要生态功能[1]。鄱阳湖是我国最大的淡水湖，对中国长江流域洪水调蓄和生物多样性保护有着重要作用[2]。鄱阳湖是吞吐型、季节型湖泊，其季节性水文变化明显。以鄱阳湖南矶山湿地自然保护区为例，在丰水期 (4—9 月)，除总面积不足 4 km^2 的南山岛和矶山岛，其他洲滩全被水淹没。而进入 10 月至次年 3 月份枯水季节，湖水逐渐消退归入河道和碟形洼地，整个湿地保护区河、湖、洲交错状态，保护区内碟形湖泊沿高程梯度下的洲滩相继露出[3]。“ 碟形湖 ”是在枯水季节显露于洲滩之中的季节性湖泊，主要是鄱阳湖水位的季节性变化造成的[4]。当前对鄱阳湖湿地消落带生态系统生物地球化学循环的研究不多[5]，主要集中在湿地植被元素生态化学计量学研究[6–7]。而对湿地土壤主要生源要素的生态化学计量学研究还有待深入[8–10]，这将有助于认识鄱阳湖内碟形湖的土壤养分循环和周转。

生态化学计量学 (ecological stoichiometry) 结合了生物学、化学等基本原理，利用生态过程中多重化学元素的平衡关系，为研究碳、氮、磷等元素在生态系统过程中的耦合关系提供了方法[11–12]。土壤是人类赖以生存与发展的重要物质基础，土壤有机碳是生物重要碳源，氮、磷是植物生长所必需的大量元素，三者含量的动态平衡及生态化学计量特征直接影响着土壤肥力和植物生长[13–15]，进而影响生态系统的生产力[16]。

目前，生态化学计量学的报道主要集中在对陆地[17–18]和水生[19–20]生态系统元素生态化学计量学的研究。Koerselman 和 Meuleman[21]提出：当植物体 N/P<14 时受氮限制，N/P>16 时受磷限制，而 N/P 在 14 ~ 16 则受氮和磷的共同限制。有研究表明，生长较为快速的生物体内 N/P 一般较低，即生长速率与氮、磷的含量呈正比[22]。对于湿地土壤和植物的生态化学计量学的研究近年来逐渐增多[23–26]，其中付珊等[27]对南矶山湿地土壤碳、氮、磷化学计量特征的研究表明：C/N 保持相对稳定，而 C/P 和 N/P 空间变异性较大。目前，关于湿地土壤碳、氮和磷的研究内容集中在不同植被类型、不同土地利用方式和不同海拔高度等，对于湿地土壤养分及其生态化学计量对高程梯度和碟形湖响应、不同湖泊之间的生态化学计量差异的研究还不多见。2012 年 8 月启动的鄱阳湖第二次科学

①基金项目：国家自然科学基金项目(31570444、31360175)和江西省科技厅项目(20161BBH80049、GJJ151097)资助。

* 通讯作者(hbfan@nit.edu.cn)

作者简介：雷学明(1993—)，男，江西上饶人，硕士研究生，主要从事土壤生态学研究。E-mail: leixm0505@163.com

考察最新研究结果表明：碟形湖有利于生物多样性保护，对鄱阳湖湿地生态系统功能的维持作用巨大。开展高程梯度和不同湖泊的变化研究，对阐明湿地土壤养分循环和对环境变化的缓冲能力具有重要意义。因此，本文以鄱阳湖南矶山 4 个碟形湖(白沙湖、南深湖、战备湖和常湖)内的 4 种高程梯度(岗地、高滩、低滩和泥沼)为研究对象，探讨高程梯度下湿地土壤养分含量及其生态化学计量的特征，为正确认识鄱阳湖内碟形湖的物质循环和周转提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究样地位于江西省鄱阳湖主湖南部的南矶山湿地自然保护区，地处赣江北支、中支和南支汇入鄱阳湖开放水域冲积形成的三角洲前缘，地理位置为 28°52′21″ ~ 29°06′46″N，116°10′24″ ~ 116°23′50″E。南矶山湿地自然保护区总面积为 3.33 万 hm^2，属于亚热带暖湿季风气候，热量资源丰富，雨量充沛，多年平均无霜期 266 d，年均气温 17.3℃，年均降水量 1 358 ~ 1 823 mm。保护区完全处在水陆过渡地带，属于典型的湿地。土壤类型主要为草甸土和水下沉积物，研究区地带性土质为红壤。据统计，保护区共有维束管植物 115 科 304 属 443 种，多为草本植物，一般生长在湖滩和沼泽环境中，是主要的湿地植被，以挺水、浮叶和沉水植物群落为主[3]。研究区湿地主要生境类型及其特征可见表 1。

表 1　南矶山湿地生境类型及其特征

Table 1　Habitat types and characteristics of Nanjishan wetland

生境类型	高程(m)	出露天数(d)	土壤类型	常见主要群丛类型
岗地	18 ~ 19	常年不受水淹	草甸土	以湿生与中生植物分布为主，主要有狗牙根、野古草和白茅群丛等
高滩	16 ~ 18	305 ~ 271	草甸土	为挺水植物分布的主要地段，主要有芦苇、南荻和芦苇+南荻群丛等
低滩	14 ~ 16	271 ~ 169	草甸沼泽土	湿生植被分布区域，可分为茂密草洲和稀疏草洲，主要有荻、虉草和灰化苔群丛等
泥沼	13 ~ 14	反复受水淹	沼泽土 潜育草甸土	水生和沼生植物混生，主要有水田碎米荠+箭叶蓼、虉草和针蔺群丛等

1.2　样品采集和处理

于 2013 年 11 月，在 4 个碟形湖内按照不同高程梯度分别选取 4 个采样点，样方规格为 10 m × 10 m，用土钻在每个样点分别取土壤深度为 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 的土样，每个样方内采集 5 钻土混成一个单独样品，共采集 32 个土壤样品，分别装入有编号的样品袋中。

剔除凋落物和石砾，取部分土样放入自封袋在 4℃ 下冷藏保存用于测定铵态氮、硝态氮和有效磷含量，其余土样风干研磨过 100 目筛，测定土壤有机碳、总氮和总磷含量。

1.3　测定方法

土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化法测定；土壤总氮(TN)含量采用半微量凯式法测定；土壤总磷(TP)含量采用硫酸–高氯酸消煮，钼锑抗比色法测定；土壤硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)含量采用 KCl 溶液浸提，流动注射分析仪测定，无机氮(IN)含量为(NO_3^--N 和 NH_4^+-N)含量之和；土壤有效磷(AP)含量采用氟化铵–盐酸浸提法测定[28]。

1.4　数据分析

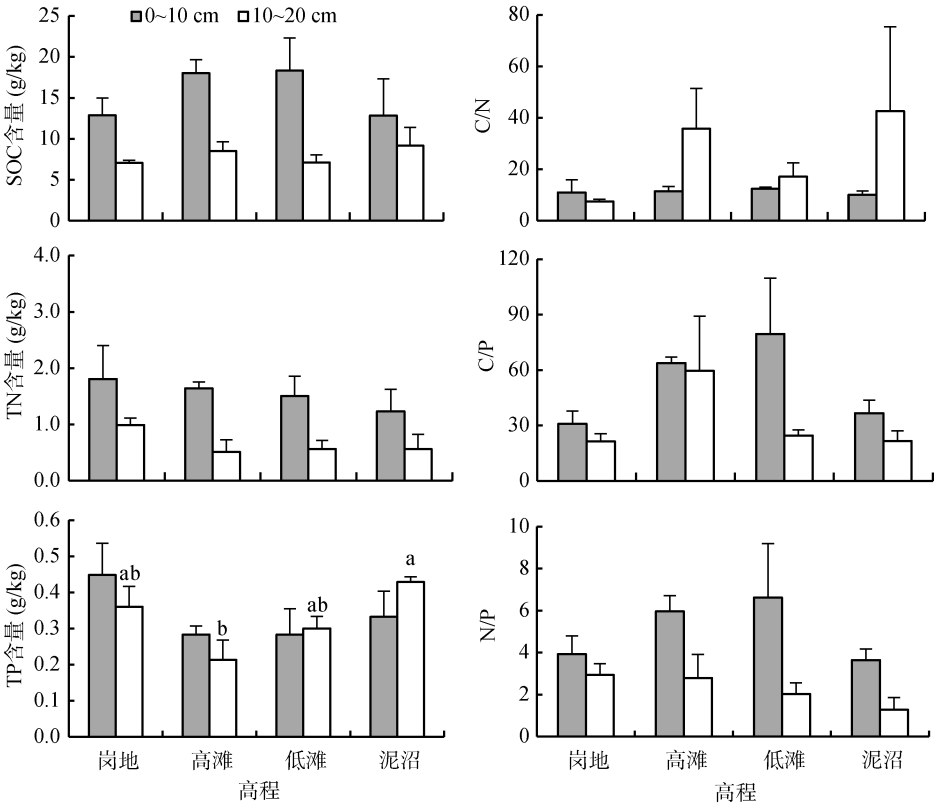
试验数据采用统计软件 SPSS19.0 进行方差分析，最小显著差异法(LSD 法)多重比较来检验差异显著性(P<0.05)，采用 Pearson 相关分析法来分析不同土壤养分及其生态化学计量间相关性。采用 Excel 2013 对数据分析以及绘图。

2　结果与分析

2.1　不同高程梯度土壤养分含量及化学计量特征

2.1.1　不同高程梯度土壤碳、氮、磷含量变化　图 1 可见，0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层土壤有机碳和总氮含量在不同高程梯度间差异都不显著(P>0.05)。而各高程梯度 0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳和总氮含量均显著高于 10 ~ 20 cm 土层(P<0.05)。总氮含量随高程降低逐渐减少，即岗地>高滩>低滩>泥沼。不同高程梯度间 0 ~ 10 cm 土层总磷含量差异不显著(P>0.05)，但 10 ~ 20 cm 土层表现出高滩总磷含量显著低于岗地和泥沼(P<0.05)，同一高程梯度不同土层的总磷含量差异不显著(P>0.05)。

2.1.2　不同高程梯度土壤碳、氮、磷化学计量特征　不同高程的碳、氮、磷化学计量比值尽管有较大波动，但 C/N、C/P 和 N/P 均未达到显著性差异(P>0.05，图 1)。



(图中误差线为标准误差，不同小写字母表示同一土层不同高程梯度间差异显著(P<0.05)，下图同)

图 1 不同高程梯度土壤碳、氮、磷含量及化学计量比

Fig. 1 Contents of carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometric ratios in soil along elevation gradients

不同高程间 0 ~ 10 cm 土层 C/N 最为接近。C/P 在低滩中最大，且随着土层加深其比值越小。N/P 在 10 ~ 20 cm 土层表现为岗地>高滩>低滩>泥沼，但差异不显著(P>0.05)。

2.1.3 不同高程梯度土壤无机氮和有效磷含量变化 由图 2 可见，0 ~ 10 cm 土层 NO_3^--N 含量表现为高滩显著低于岗地、低滩和泥沼(P<0.05)，但在 10 ~ 20 cm 土层 NO_3^--N 含量却表现出高滩最高。岗地 0 ~ 10 cm 土层 NH_4^+-N 含量显著低于泥沼，而在 10 ~ 20 cm 土层则显著低于高滩、低滩和泥沼(P<0.05)。有效磷含量在 10 ~ 20 cm 土层中表现出岗地显著高于高滩和低滩(P<0.05)。无机氮/有效磷在土壤表层表现为岗地<高滩<低滩<泥沼，但差异不显著(P>0.05)，10 ~ 20 cm 土层则表现为高滩显著高于其他高程(P<0.05)。

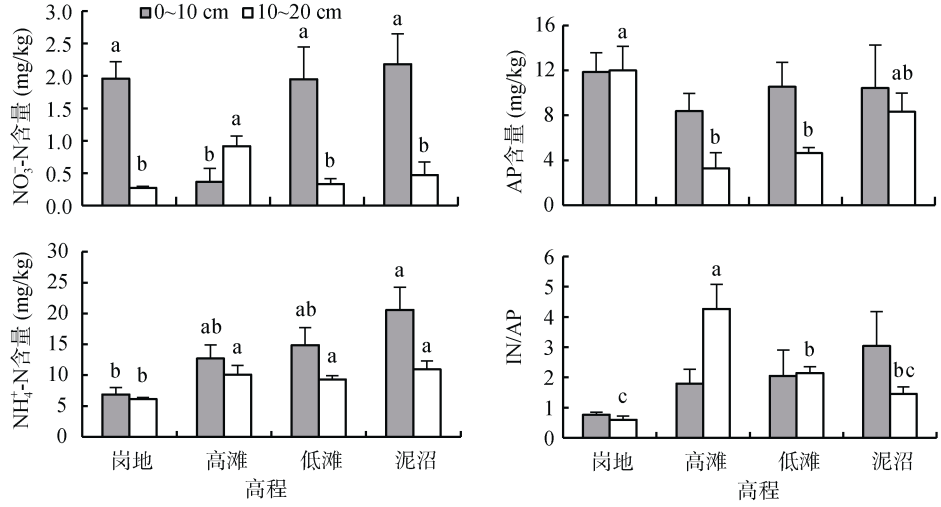


图 2 不同高程梯度土壤无机氮、有效磷含量及其比值

Fig. 2 Contents of mineral nitrogen, rapidly available phosphorus and ratios in soil along elevation gradients

2.1.4　不同高程梯度土壤养分双因素分析　　由表 2 可知，有机碳、总氮、NO_3^--N、NH_4^+-N 和 N/P 均极显著地受到土层的影响(P<0.01)，有效磷对土层有显著响应(P<0.05)；IN/AP 对高程显著响应(P<0.05)；NH_4^+-N 和有效磷同时受土层和高程显著影响(P<0.05)，只有 NO_3^--N 和 IN/AP 对土层与高程两者交互作用有显著响应(P<0.05)；而总磷和 C/P 对土层、高程及两者间交互作用均未表现出显著性响应(P>0.05)。

表 2　不同高程、土层深度及两者交互作用对土壤养分双因素分析

Table 2　Two-way ANOVA to test the effects of elevation gradient, soil depth and their interaction on soil nutrients

可变因素	土层		高程		土层×高程	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
SOC	19.449	<0.001	0.875	0.468	0.768	0.523
TN	16.234	<0.001	0.933	0.440	0.186	0.905
TP	0.213	0.649	2.646	0.072	0.691	0.566
NO_3^--N	39.809	<0.001	1.087	0.373	5.940	0.004
NH_4^+-N	11.381	0.003	7.300	0.001	1.934	0.151
AP	5.610	0.026	3.064	0.047	0.824	0.494
C/N	2.914	0.101	0.776	0.519	0.846	0.482
C/P	3.550	0.072	2.461	0.087	1.096	0.370
N/P	11.384	0.003	1.125	0.359	0.898	0.457
IN/AP	0.309	0.583	5.072	0.007	3.227	0.040

2.2　不同湖泊土壤养分含量及化学计量特征

2.2.1　不同湖泊土壤碳、氮、磷含量变化　　由图 3 可见，0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳和总氮含量相比 10 ~ 20 cm 土层要高，其中 0 ~ 10 cm 土层有机碳含量表现为白沙湖显著低于战备湖和常湖(P<0.05)；10 ~ 20 cm 土层总氮含量表现为南深湖显著低于常湖(P<0.05)。0 ~ 10 cm 土层总磷含量白沙湖显著低于南深湖，10 ~ 20 cm 土层则为白沙湖显著低于南深湖和常湖(P<0.05)，而同一湖泊两个土层间总磷含量差异不大。

2.2.2　不同湖泊土壤碳、氮、磷化学计量特征　　C/N 在 0 ~ 10 cm 土层表现为常湖>战备湖>南深湖>白沙湖；C/P 在战备湖、南深湖和常湖表现为 0 ~ 10 cm

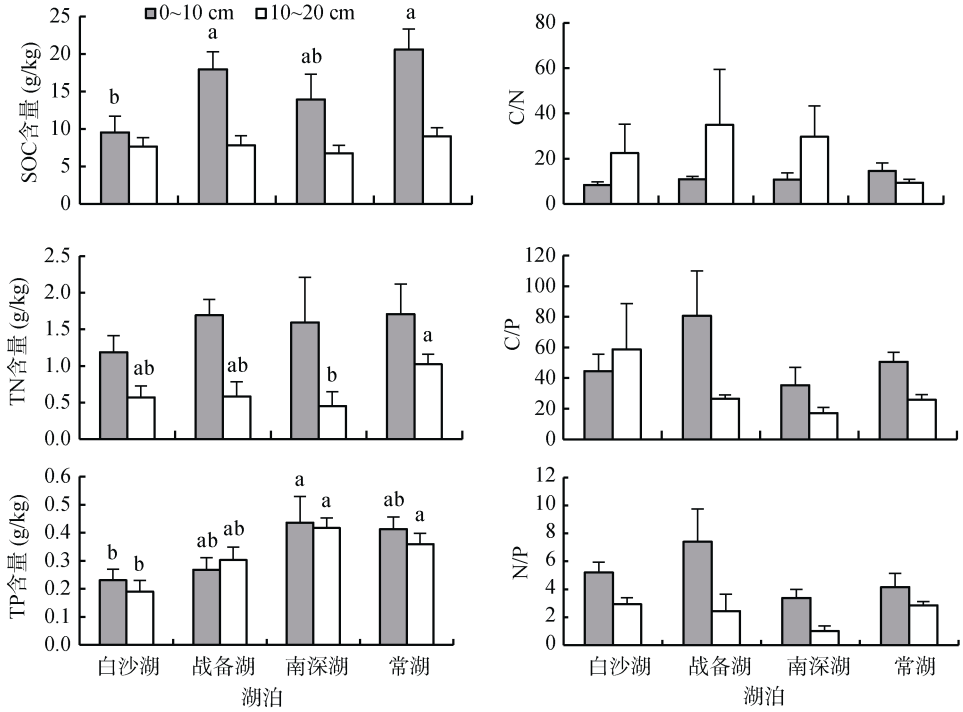


图 3　不同湖泊土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比

Fig. 3　Contents of carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometric ratios in soil under different lakes

土层大于 10 ~ 20 cm 土层；N/P 表现为 0 ~ 10 cm 土层大于 10 ~ 20 cm 土层。不同湖泊的生态化学计量 C/N、C/P 和 N/P 虽存在一定差异，但统计结果显示各湖泊间差异均未达到显著水平(P>0.05，图 3)。

2.2.3 不同湖泊土壤无机氮和有效磷含量变化 NO_3^--N 含量表现为 0 ~ 10 cm 土层大于 10 ~ 20 cm 土层，同一土层不同湖泊间 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量差异均不显著(P>0.05，图 4)。0 ~ 10 cm 土层有效磷含量表现为白沙湖<战备湖<南深湖<常湖，但仅白沙湖与常湖间差异显著(P<0.05)。各湖泊和各土层间 IN/AP 均未达到显著差异(P>0.05)。

2.2.4 不同湖泊的土壤养分及双因素分析 由表 3 可知，有机碳、总氮、NO_3^--N、NH_4^+-N、有效磷和 N/P 对土层均有显著响应；有机碳、总磷对湖泊有显著响应；各土壤养分及化学计量对土层和湖泊两者的交互作用都表现不显著。

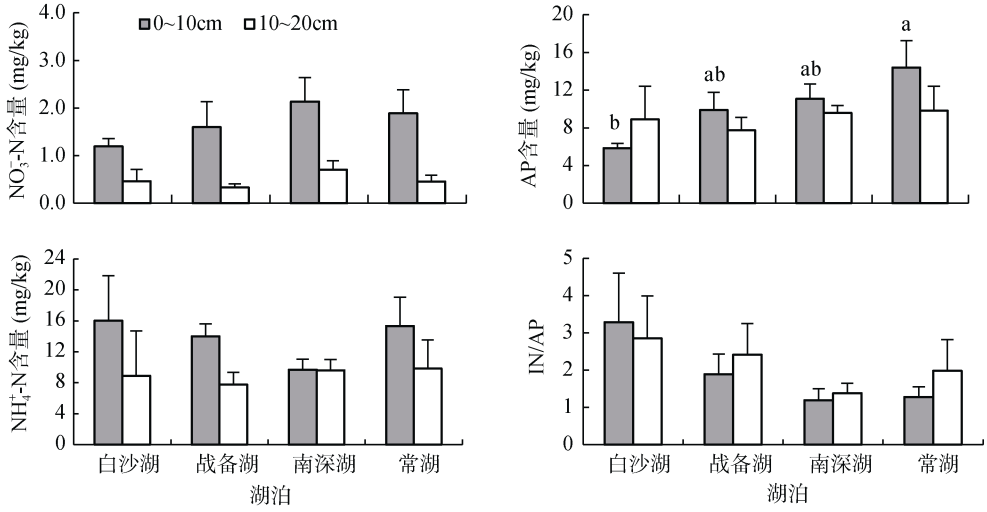


图 4 不同湖泊中土壤无机氮、速效磷含量及其比值

Fig. 4 Contents of inorganic nitrogen, rapidly available phosphorus and ratios in soil under different lakes

表 3 不同湖泊、土层深度及两者交互作用对土壤养分双因素分析

Table 3 Two-way ANOVA to test the effects of lake, soil depth and interaction on soil nutrients

可变因素	土层		湖泊		土层×湖泊	
	F	P	F	P	F	P
SOC	27.556	<0.001	3.520	0.030	2.142	0.121
TN	16.522	<0.001	0.885	0.463	0.396	0.757
TP	0.297	0.591	7.514	0.001	0.299	0.825
NO_3^--N	25.513	<0.001	1.156	0.347	0.475	0.703
NH_4^+-N	6.087	0.021	0.533	0.664	0.685	0.570
AP	5.344	0.030	2.275	0.106	1.050	0.388
C/N	2.743	0.111	0.392	0.760	0.664	0.583
C/P	3.303	0.082	1.250	0.314	1.502	0.239
N/P	12.870	0.001	2.279	0.105	1.053	0.387
IN/AP	0.192	0.665	1.936	0.151	0.200	0.895

2.3 相关性分析

对南矶山湿地土壤养分及其化学计量进行 Pearson 相关分析(表 4)，结果表明，土壤有机碳分别与总氮、有效磷、C/P 和 N/P 呈极显著(P<0.01)正相关；总氮与总磷呈显著(P<0.05)正相关，与 N/P 呈极显著正相关，但分别与速效磷和 C/N 呈极显著负相关，表明 C/N 和 N/P 均主要受氮含量的影响；总磷与有效磷呈极显著正相关，而与 C/P 和 IN/AP 呈极显著负相关，其中影响因素是磷；NO_3^--N 与其他土壤养分均不存在显著相关关系，而 NH_4^+-N 仅与 IN/AP 呈极显著正相关；有效磷与 IN/AP 呈极显著负相关；C/N 与 N/P 呈显著负相关，而 C/P 与 N/P 呈极显著正相关关系。

表 4　土壤养分和生态化学计量比特征相关分析
Table 4　Correlations between soil nutrients and ecological stoichiometric ratios

	SOC	TN	TP	NO_3^--N	NH_4^+-N	AP	C/N	C/P	N/P	IN/AP
SOC	1									
TN	0.645**	1								
TP	0.148	0.412*	1							
NO_3^--N	0.343	0.254	0.212	1						
NH_4^+-N	0.305	0.114	–0.172	0.214	1					
AP	0.576**	–0.599**	0.539**	0.265	0.061	1				
C/N	–0.027	–0.499**	–0.056	–0.11	–0.031	–0.239	1			
C/P	0.592**	0.211	–0.518**	0.085	0.206	0.05	0.139	1		
N/P	0.574**	0.659**	–0.309	0.036	0.197	0.246	–0.403*	0.668**	1	
IN/AP	–0.273	–0.347	–0.626**	–0.036	0.490**	–0.684**	0.145	0.229	–0.012	1

注：*表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)显著相关；**表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)显著相关。

3　讨论

3.1　土壤碳、氮、磷含量特征

本研究中土壤有机碳含量平均值为岗地 12.87 g/kg、高滩 18.02 g/kg、低滩 18.34 g/kg 和泥沼 12.89 g/kg。表层土壤有机碳含量高于 10 ~ 20 cm 土层，这与杭州湾湿地[29]等大部分地区的土壤有机碳分布规律相似。胡维等[30]认为这是由于土壤微生物分解了动植物残体，进而增加了表层土壤有机质。岗地有机碳含量最小，原因应该是由频繁的土壤干湿交替引起的，干湿交替使得土壤团聚体崩溃，团粒内受保护的有机碳被暴露于空气中，土壤呼吸作用强度在短时期内被大幅度地提高，使有机碳的矿化分解量增加，在一定程度上加速了有机碳的分解速率[31]。另外，岗地通风性和水热条件良好，有利于土壤微生物的生长及对有机质分解[10, 32]，这也可能是岗地土壤有机碳含量小的原因。不同湖泊的有机碳含量统计分析得出，白沙湖的有机碳含量最低且与战备湖、常湖有显著差异，这应该是白沙湖内水域面积更大以及物质交换频次更高所导致的结果[33]。例如，9 月份鄱阳湖水位开始消落，此时白沙湖湿生植物生长茂盛消耗了大量的碳源[34]，或者该区域的微生物活动较为活跃[35]，但内在的差异机制还有待进一步研究。

Lost 等[36]研究表明，湿地土壤养分的分布和变化受湿地生态系统的植物群落类型、土壤理化性质和水文条件等多种因素影响。总氮含量在不同土层都表现出岗地>高滩>低滩>泥沼，总氮含量差异可能与鄱阳湖湿地周期性干湿交替进行的脱氮过程有关，即干湿交替频率越高脱氮作用越强，使土壤氮含量更低[9]。而且氮含量随土壤深度增加而减少，与有机碳的分布基本一致，其不同土层氮分布与其他湿地[37–38]研究结果一致。此外，植物对氮元素的需求和滞留氮元素的能力也会影响土壤总氮含量[10]。

南矶山不同高程湿地土壤总磷含量有差异，这可能是鄱阳湖特殊的水文环境和其他因子共同作用的结果，因为鄱阳湖周期性水淹和干湿交替有利于湿地土壤磷的流失和淋失，使得泥沼的表层总磷含量较低[29, 39]。这也是随土壤深度增加总磷含量却没有下降的原因，表明南矶山湿地土壤总磷含量受水分条件影响较大[30]。不同湖泊间总氮和总磷含量与有机碳含量有相似的趋势，说明该区域土壤氮磷有很好的耦合关系，由 Pearson 相关分析得知总氮和总磷含量呈显著正相关($r = 0.412$，$P<0.05$)。

3.2　土壤无机氮和有效磷特征

湿地中无机态氮主要以 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 形式存在，是植物可利用氮的主要形式。研究区土壤呈弱酸性，硝化作用很弱，常态下能保持的 NO_3^--N 含量较低[40]，含量范围在 0.13 ~ 2.87 mg/kg。然而，NH_4^+-N 含量范围在 4.60 ~ 28.68 mg/kg，且岗地<高滩<低滩<泥沼。高水分导致 NO_3^--N 强烈淋溶，低温和较高的土壤 pH 会抑制土壤硝化作用，是造成低 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量分布特征的主要原因[41]。而张威等[42]认为土壤氮素的矿化和损失等过程的主要因素是湿地干湿交替过程，NH_4^+-N 是研究区土壤的优势氮源，这与其他研究结果[43]相符。湿地生态系统氮素迁移可造成湖泊中 NO_3^--N 的积累，导致水体硝酸盐污染和富营养化[44]。NO_3^--N 含量呈白沙湖<战备湖<常湖<南深湖，且随土层加深其含量也越低。白沙湖的 NH_4^+-N 含量较其他湖泊要高，这是该区域硝化作用较弱的结果。

有效磷是土壤中可被植物根系吸收的磷[39]，岗地的有效磷含量最高，即土壤可利用的有效磷更多。有效磷含量呈白沙湖<战备湖<南深湖<常湖，在 0 ~ 10 cm 土层白沙湖与常湖有显著差异。有效磷与总磷之间呈高度正相关(r = 0.539，P<0.01)，可作为衡量土壤供磷能力的一个重要指标。有效磷与无机氮/有效磷呈极显著负相关(r = –0.684，P<0.01)，与吴统贵等[45]研究结果一致。无机氮与有效磷的比值可以反映出植物对氮、磷吸收情况，无机氮/有效磷与高程梯度和湖泊类型均没有明显的相关关系。土壤无机氮/有效磷比值大于 1 即土壤中无机氮含量高于有效磷含量[44]，白沙湖中植物对氮的吸收要优先磷。

3.3 生态化学计量比

研究表明，碳、氮、磷元素的生态化学计量学理论可为阐明湿地土壤碳分解速率的差异提供有效的手段[8, 46]。低滩土壤的 C/N、C/P、N/P 最大，其土壤碳储量也表现出相同的规律[46]。研究区的土壤有机碳和总氮含量存在极显著正相关性(r = 0.645，P< 0.01)，表明土壤中的碳氮耦合稳定。研究区表层的 C/N 平均为 11.17，且不同高程其比值变化较小，表明了该区域土壤的腐殖化程度较高，有机态氮矿化作用潜力大[10]，且 C/N 与总氮呈负相关(r = –0.499，P< 0.01)。土壤有机碳主要是来自于陆源[47]。岗地的 C/N 最低，且该区域的有机质分解较快，使得有机态氮更易矿化，这与付珊等[27]的研究结论相同。C/P 主要是由土壤有机碳含量决定。研究区土壤有机碳含量与 C/P 呈极显著正相关(r = 0.592，P<0.01)，其比值在不同程度上调节着土壤的厌氧碳分解过程[10]。总氮与 N/P 呈极显著正相关(r = 0.659，P<0.01)，表层 N/P 值范围为 2.21 ~ 14.15，平均值为 5.03，相比 Tian 等[48]报道的土壤表层 N∶P = 9∶1 偏低，然而研究区主要受氮素的控制[21, 49]，而对于磷是否为研究区湿地土壤养分限制因素，还有待进一步探讨。

4 结论

1) 沿高程梯度下研究区土壤有机碳含量为低滩>高滩>泥沼>岗地，总氮含量表现出：岗地>高滩>低滩>泥沼，且有机碳和总氮含量在 0 ~ 10 cm 土层大于 10 ~ 20 cm 土层，即呈现上高下低的分布特征。湖泊之间土壤养分也表现出一定差异，主要为白沙湖的有机碳、总氮、总磷和 NO_3^--N 含量相比其他湖泊较低。

2) 研究区土壤养分在不同高程梯度有较大差异，主要是由鄱阳湖季节周期性水文变化导致。鄱阳湖湿地的干湿交替频繁，使得土壤中的氮、磷容易流失，造成研究区相比其他湿地的土壤氮、磷含量总体偏低，且氮和磷含量呈显著正相关。研究区硝化作用很弱且受水分影响，使得 NO_3^--N 含量远低于其他湿地；随着高程梯度降低，NH_4^+-N 含量升高，即岗地< 高滩<低滩<泥沼。

3) 沿高程梯度和土壤深度变化，C/N 变化较小，而 C/P 和 N/P 的变化较大，但均表现出 0 ~ 10 cm 土层高于 10 ~ 20 cm 土层。研究区的 C/N 能较好地反映出岗地土壤有机碳分解潜力，研究区土壤碳氮存在稳定的耦合关系，总氮含量是 C/N 和 N/P 的主要控制因子。

参考文献：

[1] Burkett V R, Kusler J. Climate change: Potential impacts and interactions in wetlands of the United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2): 313–320

[2] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 109–113

[3] 刘信中, 樊三宝, 胡斌华. 江西南矶湿地自然保护区综合科学考察[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 1–262

[4] 胡振鹏, 张祖芳, 刘以珍, 等. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义[J]. 江西水利科技, 2015, 41(5): 317–323

[5] 贾国梅, 牛俊涛, 席颖. 三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征[J]. 土壤, 2015, 47(5): 926–931

[6] 胡伟芳, 章文龙, 张林海, 等. 中国主要湿地植被氮和磷生态化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1041–1052

[7] Wang X L, Han J Y, Xu L G, et al. Soil characteristics in relation to vegetation communities in the wetlands of Poyang Lake, China[J]. Wetlands, 2014, 34(4): 829–839

[8] 张森, 刘德福, 刘庆, 等. 黄河三角洲不同湿地群落氮磷化学计量特征及其生境类型适应策略[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 2983–2989

[9] 余小青, 杨军, 刘乐冕, 等. 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3739–3747

[10] 张全军, 于秀波, 钱建鑫, 等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3656–3669

[11] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2–6

[12] Fan H B, Wu J P, Liu W F, et al. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations[J]. Plant and Soil, 2015, 392(1–2): 127–138

[13] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 等. 青海湖高寒湿地土壤有机碳含量变化特征分析[J]. 土壤, 2013, 45(3): 392–398

[14] Sudnitsyn I I. New manuals for forest soil science[J]. Eurasian Soil Science, 2011, 44(1): 107–108

[15] Elser J J, Matthew E S B, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of

primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135–1142
[16] 盛宣才, 邵学新, 吴明, 等. 水位对杭州湾芦苇湿地土壤有机碳、氮、磷含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 718–723
[17] Cleveland C C, Liptzin D. C∶N∶P stoichiometry in soil: Is there a ‘‘Redfield ratio’’ for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235–252
[18] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 等. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望[J]. 土壤, 2016, 48(1): 1–7
[19] Elser J J, Elser J J. Ecological stoichiometry: From sea to lake to land[J]. Tree, 2000, 15(10): 393–394
[20] 刑伟, 刘寒, 刘贵华. 生态化学计量学在水生态系统中的研究与运用[J]. 植物科学学报 2015, 33(5): 608–619
[21] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N∶P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441–1450
[22] Nielsen S L, Enriquez S, Duarte C M, et al. Scaling maximum growth rates across photosynthetic organisms[J]. Functional Ecology, 1996, 10(2): 167–175
[23] Wang W Q, Sardans J, Wang C, et al. Ecological stoichiometry of C, N, and P of invasive Phragmites australis and native Cyperus malaccensis species in the Minjiang River tidal estuarine wetlands of China[J]. Plant Ecology, 2015, 216(6): 809–822
[24] 董磊, 徐力刚, 许加星, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤环境因子对植被分布影响研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 618–626
[25] 郑艳明, 尧波, 吴琴, 等. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6488–6496
[26] 赵莉敏, 史学正, 黄耀, 等. 太湖地区表层土壤养分空间变异的影响因素研究[J]. 土壤, 2008, 40(6): 1008–1012
[27] 付姗, 吴琴, 尧波, 等. 南矶山湿地土壤碳、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
[28] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1–265
[29] Shao X X, Yang W Y, Wu M, et al. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 658–664
[30] 胡维, 葛刚, 熊勇, 等. 鄱阳湖南矶山湿地土壤养分的时空分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1785–1790
[31] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99–104
[32] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 中亚热带森林土壤微生物群落多样性随海拔梯度的变化[J]. 植物生态学报, 2013, 37(5): 397–406
[33] Furey P C, Nordin R N, Mazumder A. Water level drawdown affects physical and biogeochemical properties of littoral sediments of a reservoir and a natural lake[J]. Lake and Reservoir Management, 2004, 20(4): 280–295
[34] 赵萱. 我国不同生态型湖泊沉积物有机质赋存形态及其与重金属相互作用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012
[35] Cao C Y, Chen J M, Shao J F, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities in four sand–fixation plantations on Horqin sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(2): 227–233
[36] Lost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province, P. R. China[J]. Geoderma, 2007, 142(3): 245–250
[37] 石福臣, 李瑞利, 王绍强. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1425–1431
[38] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 等. 吉林东部土地沼泽湿地土壤碳、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
[39] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 193–199
[40] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 1–379
[41] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林不同干扰强度下土壤无机氮的变化[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1251–1256
[42] Zhang W, Zhang X D, Hong-Bo H E, et al. Research advances in soil nitrogen transformation as related to drying/wetting cycles[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(4): 783–789
[43] 葛刚, 徐燕花, 赵磊, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 619–622
[44] Li R X, Zhu M Y, Chen S, et al. Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(4): 603–607
[45] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 23–28
[46] 王维奇, 仝川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 238–242
[47] Gao J H, Yang G, Ou W X. Analyzing and quantitatively evaluating the organic matter source at different ecologic zones of tidal salt marsh, North Jiangsu Province[J]. Environmental Science, 2005, 26(6): 51–56
[48] Tian H, Chen G, 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(3): 139–151
[49] Yan E R, Wang X H, Zhou W. N:P stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, East China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 13–22

Soil Nutrients and Stoichiometry Along Elevation Gradients in Shallow-lakes of Poyang Lake Wetland

LEI Xueming[1,2], DUAN Honglang[1,2], LIU Wenfei[1,2], JI Yuhuang[3], ZHOU Jihai[1,2], WU Jianping[1,2], FAN Houbao[1,2*]

(1 *Institute of Ecology and Environmental Science*, *Nanchang Institute of Technology*, *Nanchang* 330099, *China*; 2 *Jiangxi Key Laboratory for Restoration of Degraded Ecosystems* & *Watershed Ecohydrology*, *Nanchang Institute of Technology*, *Nanchang* 330099, *China*; 3 *College of Geographical Science*, *Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *China*)

Abstract: Four types of wetland habitats, i.e. downland, high beach, low beach and swamp, were chosen as elevation gradients in 4 shallow - lakes in Nanjishan wetland nature reserve of Poyang Lake and the contents of soil C, N and P contents and their stoichiometry along the 4 elevation gradients were determined. The results showed that SOC content in 0–10 cm soil layer was lowest in the downland, TN and TP contents were ranked as downland >high beach > low beach > swamp, TN was positively correlated with TP content, SOC and TN contents were decreased with the depth of soil layer, mean ratios of C/N, C/P and N/P were 11.17, 52.74 and 5.03, respectively. In the study area, soil C/N was relatively stable, while C/P and N/P varied substantially either along elevation gradients or among shallow-lakes. NH_4^+-N content was ranked as downland < high beach < low beach < swamp, while NO_3^--N content was ranked as high beach < low beach < downland < swamp. Furthermore, AP and TP contents were positively correlated. In short, soil nutrients in the study area exhibits large variations due to the seasonal dynamics of hydrology in Poyang Lake and TN was the primary limiting factor of N/P ratio.

Key words: Poyang Lake; Nanjishan wetlands; Soil nutrients; Stoichiometric ratio; Elevation gradients; Shallow-lakes