

西洞庭湖湿地 Eh 与 pH 空间变异特征 及影响因子分析

周念清¹, 李章平¹, 李 丹¹, 刘晓群²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙 410007)

摘 要:湿地氧化还原电位(Eh)和酸碱度(pH)空间分布特征是探讨湿地污染物存在形态、迁移和转化机理的基础。在湖南省西洞庭湖区澧水和沅水入湖口湿地分别布设 2 个监测断面共 12 个钻孔, 孔深 8.0~14.0 m。通过现场和室内试验研究湿地演替带 Eh 和 pH 的分布格局和空间变异特征, 并对其影响因子进行探讨。结果表明:西洞庭湖湿地演替带监测剖面 Eh 介于-57.8~238 mV 之间, 平均值为 124.67 mV, pH 值为 5.1~9.1, 平均值为 7.4, 属于弱碱性弱还原环境; Eh 和 pH 的变异系数分别为 49.60%、11.66%, 均表现出中等变异强度; Eh 和 pH 剖面分布特征复杂, 均呈夹带斑块的层带状分布; 土壤类型、地下水位、含水率和温度均对 Eh 有重要影响, pH 主要受土壤类型和地下水位的制约, 温度与含水率对 pH 的影响不显著。

关键词:湿地; 氧化还原电位; 酸碱度; 空间变异; 影响因子; 变异系数; 洞庭湖

中图分类号:P641.3

文献标志码:A

Spatial Variability Characteristics of Eh and pH in West Dongting Lake Wetland and Analysis of Their Impact Factors

ZHOU Nian-qing¹, LI Zhang-ping¹, LI Dan¹, LIU Xiao-qun²

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Dongting Lake Water Resource Administration Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, Hunan, China)

Abstract: The spatial distribution characteristics of Eh and pH are the basis of studying contaminant existing form, migration and transformation mechanism in wetland. 12 drilling holes of the two monitoring sections are deployed in the estuary wetlands of Li River and Yuan River of the West Dongting Lake, Hunan Province, and the depths of holes are 8.0-14.0 m. Distribution pattern and spatial variability of Eh and pH were studied by the site and laboratory tests in the wetland hyporheic zones, and the impact factors were discussed. The results show that the Eh values are -57.8-238 mV with the average of 124.67 mV, and the pH values are 5.1-9.1 with the average of 7.4; the hyporheic zone of West Dongting Lake wetland is weak alkaline and reduction environment; the variable coefficients of Eh and pH are 49.60% and 11.66% respectively, and belong to medium intensity variation; the complex profile distribution characteristics of Eh and pH are layer distribution with patches; soil type, underground water level, moisture and temperature have important influences on Eh; pH is mainly affected by soil type and underground water level, whereas temperature and moisture are not significant.

Key words: wetland; Eh; pH; spatial variability; impact factor; variable coefficient; Dongting Lake

收稿日期:2015-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41272249);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110072110020)

作者简介:周念清(1964-),男,湖南石门人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail:nq.zhou@tongji.edu.cn。

0 引言

氧化还原电位(Eh)和酸碱度(pH)是反映土壤环境的重要指标,其分布特征直接影响土壤和地下水中 N、P 等多种元素及污染物的存在形态与迁移、转化过程,并与土壤类别、环境温度、土壤和地下水中溶解 O_2 及 CO_2 含量等关系密切。Kumar 等在湿地 N 循环与 Eh、pH 关系方面做了比较深入的研究^[1]。Eh 是水溶液中氧化性和还原性离子平衡后的电势,每种离子只能在一定的 Eh 范围内存在,被氧化或被还原,Eh 的突变会导致 N 的某一种形式突然减少,甚至减少到不能被吸收的水平^[2]。地下水位较高时,Eh 也较高, NO_3^- 质量浓度较高,这是由于地下水和地表水相互进行了交换^[3]。Eh 在一定范围内(100~350 mV),反硝化速率随着 Eh 的增加而减小^[4]。Brady 等指出强酸环境($pH < 5$)将限制反硝化作用进行,可能会扰乱反硝化过程,只产生 NO_2^- 或 N_2O ^[5]。Bremner 等也指出在 $pH = 5.8$ 的环境中反硝化速率很低,在 $pH = 4.1$ 的环境中更低,在 $pH < 3.6$ 的环境中反硝化几乎不可能进行^[6]。中国有关土壤理化性质的研究较多^[7-14]。陈朝阳分析了植烟土壤的 pH 状况、演变趋势及其与土壤养分的关系^[15];朱小琴等研究了农业土壤 pH 的时空变异特征,并探讨了土壤 pH 的主要影响因素^[16];郭治兴等对广东省近 30 年来土壤 pH 的时空变化特征进行了研究^[17]。以上这些研究主要是探讨不同类型土壤与 pH 的关系,也有部分学者对湿地土壤理化性质进行了研究。秦璐等分析了艾比湖湿地自然保护区土壤理化性质^[18];张平究等分析了安庆沿江退耕还湖后湿地土壤理化性质的变化特征^[19]。然而,专门针对湿地演替带 Eh 特征的研究尚不多见。

湿地演替带具有明显的生物地球化学特征^[20],是地表水与地下水之间物质和能量传输的界面及有机化合物和污染物衰减的场所^[21]。地表水中的 N 通过湿地演替界面发生作用进入地下水体中,在湿地演替带必然要发生一系列的迁移和转化作用。湿地演替带水动力条件比较复杂,演替过程中湿地环境在不断发生变化,N 对环境变化非常敏感,Eh、pH 等环境因子势必会影响 N 的迁移与转化。随着工农业生产的快速发展,众多湖泊湿地中 N 出现了大量累积^[22],富营养化明显。探讨湿地中 N 污染物的环境行为是解决湿地 N 污染最重要的途径^[23],研究湿地 Eh 和 pH 空间分布特征是探讨湿地演替带

N 迁移转化机理的基础。本文选取西洞庭湖湿地作为研究对象,通过现场和室内试验研究湿地演替带 Eh 和 pH 空间分布和变异特征,为研究 N 污染控制、水环境修复与保护奠定基础。

1 试验方案

1.1 研究区概况

洞庭湖位于湖南省北部,由东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖组成。汇入洞庭湖的内陆水系包括湘江、资江、沅水和澧水。湖面平均海拔高程为 33.5 m,总面积约 2 691 km²,其中西洞庭湖 345 km²,湿地分布广泛。每年通过湘江、资江进入洞庭湖的总氮质量浓度平均高达 2.126、1.746 mg · L⁻¹,2008 年入湖总氮量达 59 049 t^[24]。研究场地选在西洞庭湖沅水和澧水入湖口,试验区具体位置见图 1。

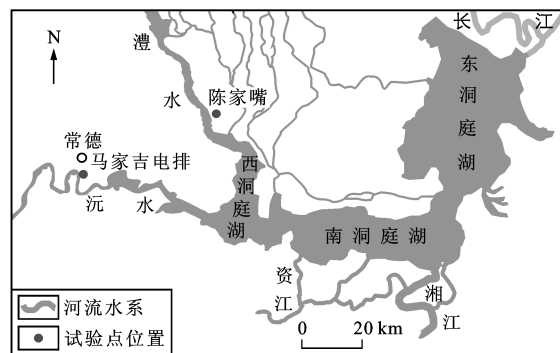


图1 试验场地位置

Fig. 1 Locations of Test Sites

1.2 试验方案布置

在西洞庭湖沅水、沅水入湖口湿地演替带各布置 2 个监测剖面,均与湖岸垂直,剖面间距为 320 m;每个剖面布设 3 个钻孔,孔间距为 30 m(图 2)。每个断面由湖及岸的钻孔设计深度分别为 12、15、18 m,孔径为 110 mm,钻孔中安装有带过滤器的 PVC 管,过滤器用滤网保护,PVC 管周围充填细砂,上部采用黏土封孔,保持钻孔中地下水位与湿地地下水位一致,便于取水样和水位监测。每月采集地表水和地下水水样 1 次,并进行 N 形态测定与分析。

1.3 现场取样与试验

2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日对西洞庭湖湿地 4 个监测剖面(Y-P1、Y-P2、L-P1 和 L-P2)进行钻孔施工。在钻探过程中,由于试验地段底部分布有老黄土层和砂卵石层,钻探施工难度较大,未达到设计深度而被迫终孔,各钻孔实际深度见表 1。部分取样深度处有流沙层分布而未能取出土样,本次共取得土样 122 个。

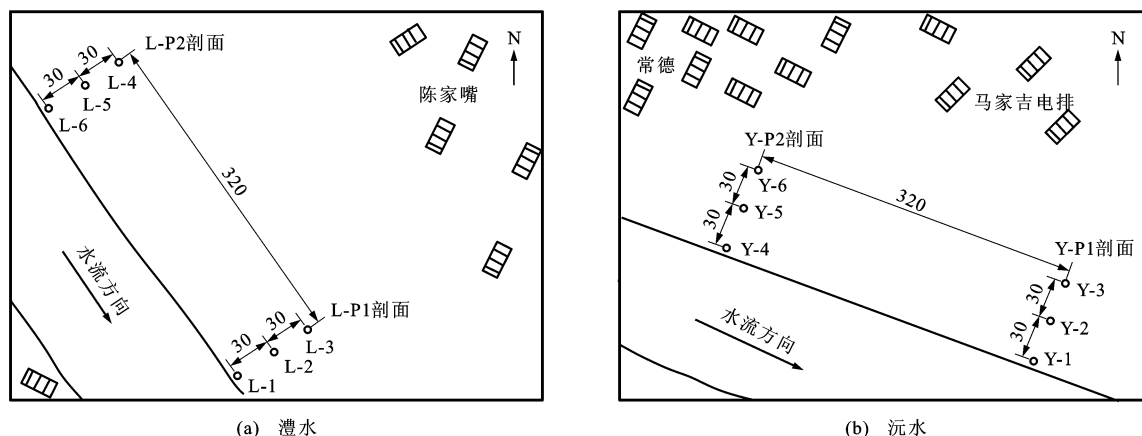


图 2 澧水、沅水监测孔平面布置(单位:m)

Fig. 2 Layouts of Monitoring Holes in Li River and Yuan River (Unit:m)

表 1 监测孔深度

Tab. 1 Depths of Monitoring Holes

钻孔及编号	孔深/m	钻孔及编号	孔深/m
澧水 1 号(L-1)	12.0	沅水 1 号(Y-1)	10.0
澧水 2 号(L-2)	13.0	沅水 2 号(Y-2)	13.0
澧水 3 号(L-3)	8.0	沅水 3 号(Y-3)	10.0
澧水 4 号(L-4)	12.0	沅水 4 号(Y-4)	10.0
澧水 5 号(L-5)	12.0	沅水 5 号(Y-5)	9.0
澧水 6 号(L-6)	9.0	沅水 6 号(Y-6)	13.0

注:钻孔 L-1~L-3 为 L-P1 剖面;钻孔 L-4~L-6 为 L-P2 剖面;

钻孔 Y-1~Y-3 为 Y-P1 剖面;钻孔 Y-4~Y-6 为 Y-P2 剖面。

在钻机钻孔提取土样时,为了减小对土样的干扰,尽可能保持其自然状态,每次快到达取样深度时停止冲水,让钻机慢慢自然下钻采取原状土样。取土样后立即用环刀采集土样,每隔 1 m 采集土样 1 个,并及时对样品编号和封装,避免土壤含水率损失,并送实验室进行含水率测定和土质分析。土壤含水率(质量比,下同)的测定根据《土工试验规程》(SL 237—1999)采用室内烘干法进行,精度为 0.01 g。

在现场钻探过程中采集的土样使用 BPH-221 便携式 ORP 计及时测定土壤和地下水 Eh、pH 和温度等参数,避免其与空气接触时间过长产生误差。为提高测量精度,用 2 台 ORP 计同时测量 2 份土壤的 Eh、pH 和温度,测定结果取平均值。Eh 精度为 0.1 mV,温度精度为 0.1 °C。

2 结果分析

2.1 Eh 分布特征

根据钻孔不同深度土样测定结果,得到 Eh 沿剖面的分布特征。氧化还原环境按 Eh 大小划分:当 Eh 值大于 300 mV 时属于氧化环境;当 Eh 值介

于 100~300 mV 之间时属于弱还原环境;当 Eh 值介于 -100~100 mV 之间时属于中等还原环境;当 Eh 值小于 -100 mV 时属于强还原环境。在监测深度范围内,根据 Eh 测定结果(表 2),澧水湿地 L-P1 剖面 Eh 值介于 48.5~238 mV 之间,平均值为 139.3 mV,随着深度增加呈现由大变小再增大的趋势;而 L-P2 剖面 Eh 值为 96.5~161.8 mV,平均值为 123.8 mV,随着深度增加呈现由大变小的趋势。

将澧水湿地不同深度测得的 Eh 绘制成 Eh-深度关系曲线(图 3),未取出土样的位置 Eh 缺失。随着深度增加,Eh 有下降的趋势,表明氧化还原环境随着深度增加不断发生变化,除个别部位变化幅度较大外,总体呈现出氧化性略微减弱,而还原性略有增强的变化趋势。

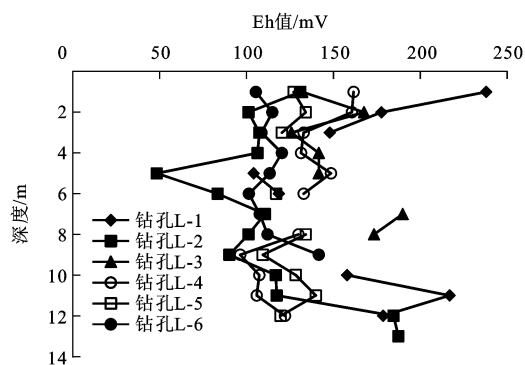


图 3 澧水湿地 Eh 与深度的关系

Fig. 3 Relationships Between Eh and Depth in Li River Wetland

测定沅水湿地演替带 Y-P1 和 Y-P2 剖面钻孔土样的 Eh,Y-P1 剖面 Eh 值介于 117.8~205.3 mV 之间,平均值为 177.2 mV,Y-P2 剖面 Eh 值为 -57.8~172.0 mV,平均值为 60.1 mV。Y-P1 剖面 Eh 靠近湖岸较小,远离湖岸方向有增大趋势,而 Y-P2 剖面

表 2 不同深度土壤 Eh 值
Tab. 2 Eh Values of Soils at Different Depths

深度/m	不同钻孔土壤 Eh 值											
	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5	L-6	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6
1.0	238.00	131.00	132.25	161.75	127.25	105.50	163.00	176.75	122.50	126.75	−11.00	112.75
2.0	178.00	101.25	167.75	160.75	134.25	115.00	117.75	184.75	177.00	103.75	−11.50	134.25
3.0	146.00	107.50	126.00	133.00	120.50	108.75	158.25	193.50	196.00	138.25	92.00	−57.75
4.0		106.50	141.75	131.50		120.50	163.50	197.50	159.50	121.25	28.50	−26.50
5.0	104.00	48.50	141.75	148.75		113.50	179.50	204.25	176.25	151.00	−20.25	−25.75
6.0	119.00	83.50		133.00	117.25	101.50	202.25	184.75	151.75	136.25	−54.75	44.75
7.0		110.75	190.00			107.75	178.00	188.00	186.25	141.50	−9.50	33.75
8.0		101.25	173.50	130.00	134.25	112.25	179.50	179.25	173.25	155.00	−16.50	68.75
9.0		90.25		96.50	109.50	141.75	147.75	198.00	161.50	172.00	40.50	56.75
10.0	158.00	117.00		107.50	128.50			194.00	180.50	166.50		32.50
11.0	217.00	117.50		106.00	140.00			191.75				89.00
12.0	178.00	184.75		122.25	119.75			205.25				18.25
13.0		187.50						199.00				−6.25

Eh 则表现出相反的趋势。这种现象与湖岸土层分布以及地下水与地表水相互补给的流向分布有关,根据地下水与地表水位,Y-P1 剖面地下水补给河水,远离湖岸方向氧化性有增强的趋势,Y-P2 剖面是地表水补给地下水,远离湖岸方向氧化性表现为减弱的趋势。

沅水湿地演替带测得的 Eh 随深度变化的关系曲线见图 4。随着深度增加,钻孔 Y-5 和 Y-6 测得的 Eh 变化幅度较大,钻孔 Y-1、Y-2、Y-3 和 Y-4 测得的相对较稳定,呈现出略有增大的趋势。

2.2 pH 分布特征

在测定 Eh 的同时对土样的 pH 进行测试,数据见表 3。L-P1 剖面 pH 值介于 5.7~7.7 之间,平均值为 6.6,由湖及岸呈现出逐渐升高的趋势;L-P2 剖面 pH 值为 6.4~9.1,平均值为 7.7,由湖及岸呈

现逐渐降低的趋势,但 2 个监测剖面由浅入深的 pH 均呈现逐渐增大的趋势。

澧水湿地土样测定的 pH 随深度变化的关系见图 5。由图 5 可知,随着深度增加,钻孔 L-1、L-5 和 L-6 测得的 pH 变化幅度较大,而钻孔 L-2、L-3 和 L-4 测得的相对较稳定,且呈现出略微增大的趋势。

沅水湿地不同深度土样测得的 pH 随深度变化的关系曲线见图 6。从图 6 可以看出:Y-P1 剖面 pH 值介于 5.1~8.9 之间,平均值为 7.6;Y-P2 剖面 pH 值为 6.7~8.9,平均值为 7.8。Y-P1、Y-P2 剖面 pH 均呈靠近湖岸较大,远离湖岸方向减小的趋势;Y-P1 剖面 pH 由浅入深呈现逐渐降低趋势,而 Y-P2 剖面 pH 则表现出相反的趋势。随着深度增加,钻孔 Y-1、Y-2 和 Y-3 测得的 pH 变化幅度较大,钻孔 Y-4、Y-5 和 Y-6 测得的相对较稳定,呈现

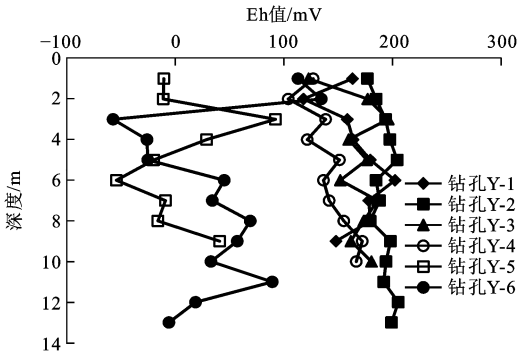


图 4 沅水湿地 Eh 与深度的关系
Fig. 4 Relationships Between Eh and Depth in Yuan River Wetland

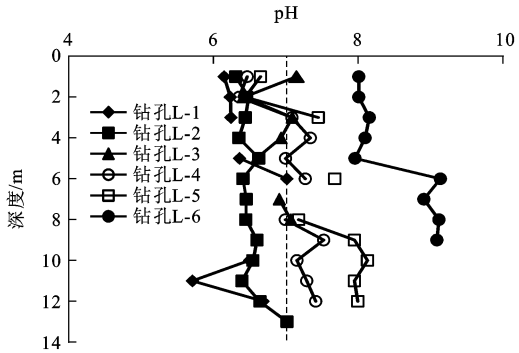


图 5 澧水湿地 pH 与深度的关系
Fig. 5 Relationships Between pH and Depth in Li River Wetland

表 3 不同深度土壤 pH 值
Tab. 3 pH Values of Soils at Different Depths

深度/m	不同钻孔土壤 pH 值											
	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5	L-6	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6
1.0	6.15	6.31	7.15	6.47	6.81	8.01	7.95	8.44	7.98	7.28	7.84	6.31
2.0	6.24	6.49	6.43	6.36	6.72	8.01	8.61	7.10	7.77	6.71	8.10	6.49
3.0	6.24	6.44	7.09	7.09	7.45	8.16	8.05	8.34	7.31	7.20	7.94	6.44
4.0		6.35	6.94	7.34		8.10	8.95	8.28	7.21	7.81	8.08	6.35
5.0	6.36	6.63	6.60	7.00		7.96	8.93	7.02	7.52	7.56	7.95	6.63
6.0	7.02	6.40		7.27	7.68	9.14	7.19	8.44	5.13	8.01	7.91	6.40
7.0		6.46	6.91			8.91	8.50	8.42	5.58	7.69	7.86	6.46
8.0		6.45	7.07	7.00	7.18	9.12	8.65	7.39	5.31	7.96	7.54	6.45
9.0		6.60		7.53	7.95	9.09	8.41	8.18	5.49	7.74	8.94	6.60
10.0	6.50	6.55		7.16	8.13			8.22	5.33	7.90		6.55
11.0	5.71	6.40		7.29	7.95			6.93				6.40
12.0	6.69	6.64		7.42	8.00			7.22				6.64
13.0		7.02						8.18				7.02

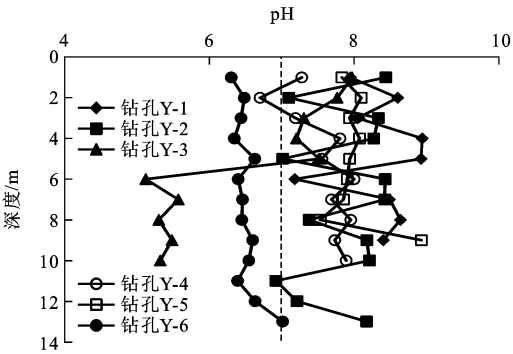


图 6 沅水湿地 pH 与深度的关系
Fig. 6 Relationships Between pH and Depth in Yuan River Wetland

出略微增大的趋势。

2.3 Eh 和 pH 空间变异特征

描述区域化变量空间变异程度常用变异系数 (C_v) 来表达,其计算公式为

$$C_v = \frac{C_s}{C_{ave}} \times 100\%$$
 (1)

其中

$$C_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - C_{ave})^2 / n}$$
 (2)

$$C_{ave} = \sum_{i=1}^n x_i / n$$
 (3)

式中: C_s 为标准差; C_{ave} 为平均值; x_i 为第 i 个实测值; n 为样本个数。

常用的判别标准为:当 $C_v \leq 10\%$ 时,空间变异程度为弱变异性;当 $10\% < C_v < 100\%$ 时,空间变异

程度为中等变异性;当 $C_v \geq 100\%$ 时,空间变异程度为强变异性。

2.3.1 Eh 空间变异性

澧水湿地 L-P1、L-P2 剖面的 Eh 平均值分别为 139.31、123.75 mV,表明澧水湿地演替带氧化性由上游断面(L-P2 剖面)向下游断面(L-P1 剖面)呈现略有增强趋势;L-P1、L-P2 剖面的 C_v 分别为 31.1%、13.47%,表明澧水湿地演替带 L-P1 剖面比 L-P2 剖面的 Eh 空间变异性要大。

沅水湿地 Y-P1、Y-P2 剖面的 Eh 平均值分别为 177.21、60.13 mV,沅水湿地演替带氧化性由上游断面(Y-P2 剖面)向下游断面(Y-P1 剖面)呈现略有增强趋势;Y-P1、Y-P2 剖面的 C_v 分别为 12.11%、118.9%,表明沅水湿地演替带 Y-P2 剖面 Eh 具有强变异性,变异强度由上游断面向下游断面呈现减弱趋势。

澧水和沅水湿地演替带的 Eh 平均值分别为 131.39、118.67 mV,说明澧水湿地演替带氧化性比沅水湿地略强;澧水和沅水湿地演替带的 C_v 分别为 25.30%、66.48%,说明沅水湿地演替带 Eh 空间变异性更大。

西洞庭湖湿地演替带 Eh 平均值为 124.67 mV,属于弱还原环境; C_v 为 49.60%,Eh 总体上具有中等变异性。

2.3.2 pH 空间变异性

澧水湿地 L-P1、L-P2 剖面 pH 平均值分别为 6.7、7.7,说明澧水湿地演替带碱性沿上游断面向下

游断面减弱;L-P1、L-P2 剖面的 C_v 分别为 5.04%、9.90%,表明澧水湿地演替带 pH 变异强度沿上游断面向下游断面减小。

沅水湿地 Y-P1、Y-P2 剖面 pH 平均值分别为 7.56、7.84,总体为偏碱性,但沅水湿地演替带上游断面(Y-P2 剖面)的碱性略强于下游断面(Y-P1 剖面);Y-P1、Y-P2 剖面的 C_v 分别为 14.73%、4.57%,表明沅水湿地演替带 pH 变异强度下游比上游略大。

澧水和沅水湿地演替带 pH 平均值分别为 7.13、7.71,总体表现为土壤偏碱性,且沅水湿地演替带碱性比澧水要强;澧水和沅水湿地的 C_v 分别为 11.29%、10.81%,说明澧水湿地演替带 pH 变异强度较沅水湿地演替带大。

西洞庭湖湿地演替带总体 pH 平均值为 7.43, C_v 为 11.66%,表明其 pH 具有中等变异性。

3 讨 论

3.1 Eh 和 pH 相互影响

对西洞庭湖湿地演替带 Eh 与 pH 进行相关性分析(图 7)。Eh 与 pH 呈负相关关系,相关系数为 -0.229 。给定显著性水平 0.01,经双侧检验,对应显著不相关的概率为 0.006,小于 0.01,说明 Eh 与 pH 显著相关,相互间有重要影响。

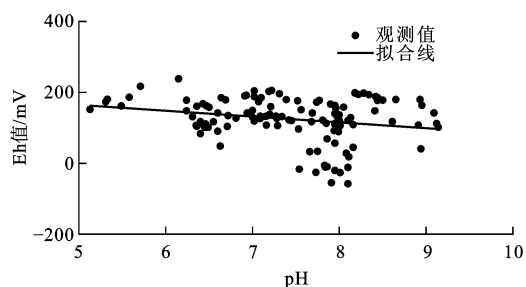


图 7 Eh 与 pH 的相关关系

Fig. 7 Correlation Between Eh and pH

3.2 土壤类型

不同类型的土壤具有不同孔隙度、渗透系数、保水性和通气性等,以致土壤中 O_2 及 CO_2 含量均不同,从而影响土壤环境中的 Eh 和 pH。澧水湿地演替带主要是黏土层和黄土层,土壤含水率较高,土壤孔隙内含氧量较少,导致 Eh 偏低。沅水湿地演替带主要是砂土层和砂层,土壤孔隙度较大,含水率较低,而含氧量较高,使沅水湿地 Y-P1 剖面的土壤 Eh 整体较高。黏土层 Eh 和 pH 分布特征基本一致,而砂土层分布特征与黏土层差别很大。由此可见,土壤类型对 Eh 和 pH 也具有重要影响。

3.3 温 度

根据测定的 Eh、pH 和温度数据,Eh 与温度呈正相关关系,pH 与温度呈负相关关系(图 8),相关系数分别为 0.323、 -0.171 。给定显著性水平 0.01,检验其相关关系的显著性,对应的显著不相关概率分别为 0、0.061;前者小于 0.01,即 Eh 与温度显著相关,后者大于 0.01,即 pH 与温度相关性不显著。这说明温度对 Eh 有重要影响,而对 pH 的影响较小。Eh 是土壤电化学性质的重要参数之一,土壤内不同离子都具有一定的氧化还原能力,而温度是影响这些离子存在比例的重要因素。当土壤内离子比例发生变化时,Eh 也相应会发生变化,因此,温度对 Eh 影响较大。土壤 pH 主要受土壤内氢离子(H^+)含量影响,温度对 H^+ 的影响较小,因此,温度对 pH 影响也较小。

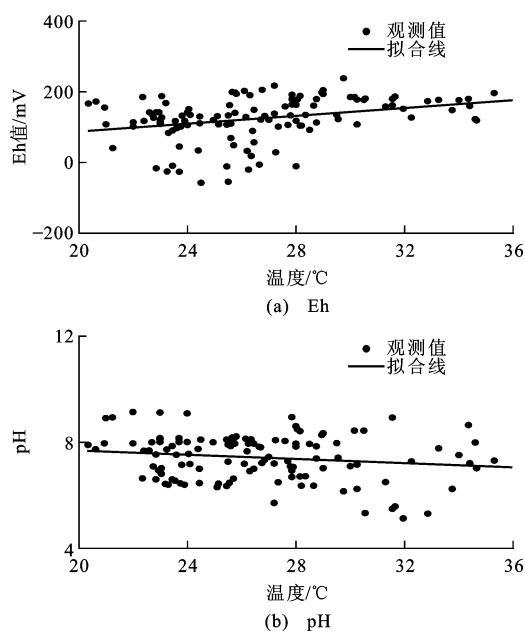


图 8 Eh、pH 与温度的相关关系

Fig. 8 Correlations of Eh and pH to Temperature

3.4 含水率

Eh、pH 与含水率相关性分析结果见图 9。从图 9 可以看出,Eh、pH 均与含水率呈负相关关系,相关系数分别为 -0.246 、 -0.067 。给定显著性水平 0.01,检验其相关关系的显著性,对应显著不相关的概率分别为 0、0.044;前者小于 0.01,即 Eh 与含水率显著相关,后者大于 0.01,即 pH 与含水率相关性不显著。这说明含水率也对 Eh 有较大影响,而对 pH 的影响较小。当土壤含水率较高时,土壤孔隙内含氧量较少,Eh 则较小,因为 O_2 是决定 Eh 大小的关键因素之一。同样地,土壤 pH 主要受

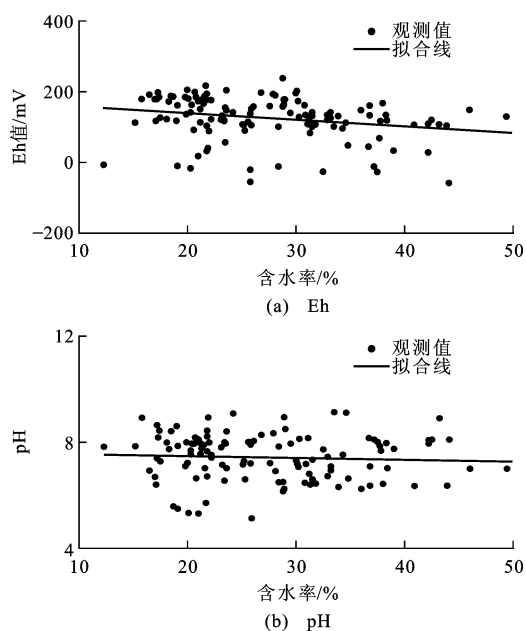


图 9 Eh、pH 与含水率的相关关系

Fig. 9 Correlations of Eh and pH to Moisture

土壤内 H^+ 含量的影响,含水率对 H^+ 的影响较小,因而对 pH 影响也较小。

4 结 语

(1)西洞庭湖湿地演替带 Eh 和 pH 剖面分布特征比较复杂,呈夹带斑块的层带状分布。澧水湿地 Eh 介于 48.5~238 mV 之间,平均值为 126.5 mV,随着深度增加呈略微下降的趋势;pH 值介于 5.7~9.1 之间,平均值为 7.1。沅水湿地 Eh 值介于 -57.8~205.3 mV 之间,平均值为 118.6 mV;pH 值介于 5.1~8.9 之间,平均值为 7.7;随着深度增加,Eh 和 pH 均呈略有增大的趋势,这与包气带氧化环境有关。

(2)西洞庭湖湿地演替带为弱碱性的还原环境,Eh 平均值为 124.67 mV,澧水湿地比沅水湿地高;pH 平均值为 7.43,沅水湿地比澧水湿地高,二者均表现为中等变异强度;沅水湿地 Eh 变异程度比澧水湿地大,而澧水湿地 pH 变异程度较沅水湿地大。

(3)西洞庭湖湿地演替带 Eh 主要受土壤类型、地下水位、温度和含水率的影响,pH 主要受土壤类型、地下水位的影响,而温度、含水率对 pH 的影响不显著。

参考文献:

References:

[1] KUMAR A R, RIYAZUDDIN P. Seasonal Variation of Redox Species and Redox Potentials in Shallow

Groundwater: A Comparison of Measured and Calculated Redox Potentials[J]. Journal of Hydrology, 2012, 444/445: 187-198.

[2] FISHER S G, GRIMM N B, MARTI E, et al. Material Spiraling in Stream Corridors: A Telescoping Ecosystem Model[J]. Ecosystems, 1998, 1(1): 19-34.

[3] MAYER P M, GROFFMAN P M, STRIZ E A, et al. Nitrogen Dynamics at the Groundwater-surface Water Interface of a Degraded Urban Stream[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 39(3): 810-823.

[4] SCHON G, GEYWITZ S, MERTENS F. Influence of Dissolved Oxygen and Oxidation-reduction Potential on Phosphate Release and Uptake by Activated Sludge from Sewage Plants with Enhanced Biological Phosphorus Removal[J]. Water Research, 1993, 27(3): 349-354.

[5] BRADY N C, WEIL R R. The Nature and Properties of Soils[M]. 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

[6] BREMER J M, SHAW K. Denitrification in Soil: II. Factors Affecting Denitrification[J]. Journal of Agricultural Science, 1958, 51: 40-52.

[7] 郑真, 杨艳芳, 孔令柱, 等. 退耕还湖后菜子湖湿地土壤理化性质及微生物量变化[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 821-826.

ZHENG Zhen, YANG Yan-fang, KONG Ling-zhu, et al. Changes of Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Biomass in Wetlands Returning Farmland to Lake in the Caizi Lakes, Anhui Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 821-826.

[8] 龚冬琴, 吕军. 连续免耕对不同质地稻田土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 239-246.

GONG Dong-qin, LU Jun. Effects of Soil Texture on Variations of Paddy Soil Physical and Chemical Properties Under Continuous No Tillage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 239-246.

[9] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.

WU Yu, XU Gang, LU Ying-chun, et al. Effects of Biochar Amendment on Soil Physical and Chemical Properties: Current Status and Knowledge Gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79.

[10] 徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1558-1561.

XU Wei-wei, QIAO Mu. Soil Carbon Contents in Relation to Soil Physicochemical Properties in Arid Re-

- gions of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6):1558-1561.
- [11] 黄 蓉,王 辉,王 蕙,等. 围封年限对沙质草地土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 183-197.
HUANG Rong, WANG Hui, WANG Hui, et al. Effects of Enclosure Year on Soil Physicochemical Properties of Sandy Grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):183-197.
- [12] 李建查,张国盛,倪振伟,等. 退耕对滇池湖滨土壤理化性质与无机磷分布的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3):95-100.
LI Jian-cha, ZHANG Guo-sheng, NI Zhen-wei, et al. Effect of Restoration on Soil Physicochemical Properties and Distribution of Soil Inorganic Phosphorus in Dianchi Lake Catchment[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3):95-100.
- [13] 张德健,路战远,张向前,等. 不同耕作措施对玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(12):209-213.
ZHANG De-jian, LU Zhan-yuan, ZHANG Xiang-qian, et al. Effects of Different Tillage Methods on Maize Yield and Soil Physical and Chemical Characters of Maize Field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(12):209-213.
- [14] 盛茂银,熊康宁,崔高仰,等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. *生态学报*, 2015, 35(2):434-448.
SHENG Mao-yin, XIONG Kang-ning, CUI Gao-yang, et al. Plant Diversity and Soil Physical-chemical Properties in Karst Rocky Desertification Ecosystem of Guizhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 434-448.
- [15] 陈朝阳. 南平市植烟土壤 pH 状况及其与土壤有效养分的关系[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(5):149-153.
CHEN Chao-yang. The Relationships of pH and Available Nutrient in Nanping Tobacco-growing Soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5):149-153.
- [16] 朱小琴,孙维侠,黄 标,等. 长江三角洲城乡交错区农业土壤 pH 特征及影响因素探讨:以江苏省无锡市为例[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4):594-602.
ZHU Xiao-qin, SUN Wei-xia, HUANG Biao, et al. pH Characters of Agricultural Soil in Peri-urban Areas of the Yangtze River Delta Region and Their Affecting Factors: A Case Study of Wuxi City, Jiangsu Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 594-602.
- [17] 郭治兴,王 静,柴 敏,等. 近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 425-430.
GUO Zhi-xing, WANG Jing, CHAI Min, et al. Spatio-temporal Variation of Soil pH in Guangdong Province of China in Past 30 Years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2):425-430.
- [18] 秦 璐,傅德平,杨 军,等. 艾比湖湿地自然保护区典型群落土壤理化性质分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(8):144-151.
QIN Lu, FU De-ping, YANG Jun, et al. The Soil Physicochemical Properties of Typical Communities in Ebinur Lake Wetlands Nature Reserve[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(8): 144-151.
- [19] 张平究,赵永强,孟向东,等. 退耕还湖后安庆沿江湿地土壤理化性质变化[J]. *土壤通报*, 2011, 42(6): 1319-1323.
ZHANG Ping-jiu, ZHAO Yong-qiang, MENG Xiang-dong, et al. Changes of Soil Physical and Chemical Properties in Wetlands Recovered from Farmlands Along the Yangtze River in Anqing[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6):1319-1323.
- [20] FLECKENSTEIN J H, KRAUSE S, HANNAH D M, et al. Groundwater-surface Water Interactions: New Methods and Models to Improve Understanding of Processes and Dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(11):1291-1295.
- [21] ROBERTSON A L, WOOD P J. Ecology of the Hyporheic Zone:Origins, Current Knowledge and Future Directions[J]. *Fundamental and Applied Limnology/ Archiv fur Hydrobiologie*, 2010, 176(4):279-289.
- [22] SALVATO M, BORINA M, DONIB S, et al. Wetland Plants, Micro-organisms and Enzymatic Activities Interrelations in Treating N Polluted Water[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47:36-43.
- [23] 周念清,赵 珊,沈新平. 天然湿地演替氮循环研究进展[J]. *科学通报*, 2014, 59(18):1688-1699.
ZHOU Nian-qing, ZHAO Shan, SHEN Xin-ping. Nitrogen Cycle in the Hyporheic Zone of Natural Wetlands[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(18): 1688-1699.
- [24] 秦迪岚,罗岳平,黄 哲,等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(8):193-198.
QIN Di-lan, LUO Yue-ping, HUANG Zhe, et al. Pollution Status and Source Analysis of Water Environment in Dongting Lake[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 35(8):193-198.