

滨湖城市典型公园化河口岸带土壤理化性状研究^①

乔红霞¹, 蒋媛², 付子轶¹, 王俊力¹, 张镭¹, 刘福兴^{1*}

(1 上海市农业科学院, 上海 201403; 2 无锡恒诚水利工程建设有限公司, 无锡 214000)

摘要:为摸清五里湖公园化河口岸带土壤理化性质, 探明土壤质量状况, 本研究于 2017 年 10 月对五里湖 3 个典型公园化河口区域(陆典桥浜 L、梁塘河 C、圩田里河 W)的 24 个点位进行岸带土壤采集, 分析土壤颗粒组成、容重(BD)和孔隙度(P_f)等物理性状和 pH、有机质(OM)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)和有效磷(AP)等化学性状, 并利用与植物生长相关的土壤指标(石砾、砂粒、黏粒、BD、pH、OM、TN、AN、TP、AP)进行土壤质量指数(SQI)评价。结果表明: 3 个河口岸带土壤均存在结构退化的情况, 土壤主要以石块和石砾为主($>700 \text{ g/kg}$), 砂粒、粉粒和黏粒含量较低, 土壤容重偏大($>1.35 \text{ g/cm}^3$), 孔隙度偏低($<50\%$); 3 个河口岸带土壤 pH 均呈碱性(平均 8.30), 且陆典桥浜河口 $>$ 圩田里河河口 $>$ 梁塘河河口, AP 含量趋势相反; 除梁塘河河口 TP 含量差异不大外, 陆典桥浜和梁塘河河口的 OM、TN、AN、AP、TP 均呈现近岸大于远岸的趋势。3 个河口岸带土壤质量状况均较差($\text{SQI}<0.5$), AN、BD、OM、AP 和 pH 是影响研究区域岸带土壤质量的 5 个主因子。

关键词:河口; 岸带; 土壤; 理化性质; 土壤质量指数(SQI)

中图分类号: S153; X825 文献标识码: A

河岸带是陆河交界的过渡地带, 是各类相互作用的汇集处。作为河岸带中的一种, 河口岸带受到河流和湖泊的共同作用, 其本身具有脆弱性^[1]。滨湖城市河口区域由于受人类干扰严重, 又存在其特殊性。随着城市化进程的加快, 城市空间不断扩展, 陆域空间的限制导致滨湖城市河口区域湿地面积萎缩、生物多样性锐减、生态系统的结构受到破坏^[2], 从而对河口生态系统功能造成影响。

滨湖城市河口岸带区域多为公园, 在社会功能上发挥着重要的作用。土壤是公园化河口生态系统的一个重要的组成要素, 由于公园的客流量较大, 再加上为了景观而进行的人工改造, 使公园土壤受到人为干扰和破坏^[3]。因此, 若能充分了解滨湖城市河口岸带的土壤状况, 从而针对性地进行生态修复, 有利于河口生态系统各个功能的有效发挥。土壤物理性质是其结构状况、持水性能、渗透能力及保水能力的综合反映, 影响土壤中的水分转移方式和途径^[4]; 土壤化学性质影响土壤的养分状况, 从而影响到植物生长和岸

带植被的缓冲作用^[5]。土壤质量是土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量 3 方面的综合量度, 即土壤在生态系统内, 维持生物的生产能力、保护环境质量及促进动植物健康的能力^[6-7]。土壤质量指数(SQI)利用土壤的理化指标来综合评价土壤质量, 准确的土壤质量评价不仅能够反映生态系统的变化^[8], 还能根据评价结果制定适当的管理措施以改善土壤质量, 为土壤的可持续利用提供依据。

当前关于河口岸带区域的研究, 多以入海河口为主^[9]; 关于公园土壤的研究, 多以城市内公园为主^[10], 而对于滨湖城市公园化河口岸带土壤质量的研究鲜有报道。因此, 本研究于 2017 年 10 月对滨湖城市 3 个典型公园化河口区域的 24 个点位进行岸带土壤采集, 分析了土壤理化指标并利用 SQI 对岸带土壤进行了综合质量评价, 以识别影响该区土壤质量的主要指标, 为滨湖区公园化河口岸带修复提供科学依据, 为同类河口岸带的土壤修复提供思路, 并为恢复和重建被人类活动破坏的岸带提供理论依据。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2017ZX07203-005)、国家自然科学基金项目(41807397)、上海市青年科技启明星计划项目(19QC1400700)、上海市农业科学院学科领域建设专项和企业科技研发项目(HCY2019-01)资助。

* 通讯作者(liufuxing@126.com)

作者简介: 乔红霞(1975—), 女, 黑龙江牡丹江人, 硕士, 副研究员, 主要从事农业面源污染及河岸带水土联动修复技术研究。E-mail: qiaohongxia@saas.sh.cn

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

五里湖(31°30'07" ~ 31°32'48" N, 120°15'11" ~ 120°13'54" E)是太湖梅梁湾伸入无锡市的内湖,水域面积为 8.6 km²,东西长 6 km,南北宽 0.3 ~ 1.2 km,环湖一周约 21 km。无锡是江苏省的第二大城市,在太湖流域中占有重要地位,人口稠密、经济发达,2016 年无锡人口达到 486 万,国内生产总值(GDP)达 9 210 亿元^[11]。无锡市位于亚热带季风气候区,年均温为 18℃(12.2 ~ 20.1℃),年降水量为 843.6 mm^[12]。

五里湖出入湖河口区域大部分位于公园内,本研究选择了 3 个典型公园化河口区域进行土壤理化性状研究,河口岸带状况如表 1 所述,位置和采样点位如图 1 所示。采样点位的选择主要依据到水陆边界的距离:离岸边 5 m 处(每个河口的 1 号点位)设为近岸点位;离岸边 30 m 处(每个河口的 2 号点位)设为远岸点位。其中,圩田里河河口岸带狭长,岸上距离较短,故只设近岸点位。采样位置编号如下:陆典桥浜河口(L)近岸和远岸分别为 L1 和 L2;梁塘河河口(C)近岸和远岸分别为 C1 和 C2;圩田里河河口(W)西部分支和东部分支分别为 WW 和 WE,每个位置设 4 个采样点位,共计 24 个采样点位。

表 1 研究区河口岸带状况
Table 1 Situation of three studied estuaries around Wuli lakeshore

河口名称	公园名称	坡岸状况	坡比	植被情况
陆典桥浜河口	渔夫岛绿地公园, 建于 2005 年	北岸: 自然坡岸; 南岸: 直立硬质驳岸	均为 1 : 6	人工草坪
梁塘河河口	金城湾公园, 建于 2005 年	西岸: 景观石砌岸; 东岸: 自然坡岸	西岸: 1 : 5; 东岸: 1 : 1	西岸: 自然草坪、乔灌木; 东岸: 近岸为人工草坪, 远岸为林地
圩田里河河口	金城湾公园, 建于 2005 年	均为自然坡岸	均为 1 : 4	自然草坪、乔灌木

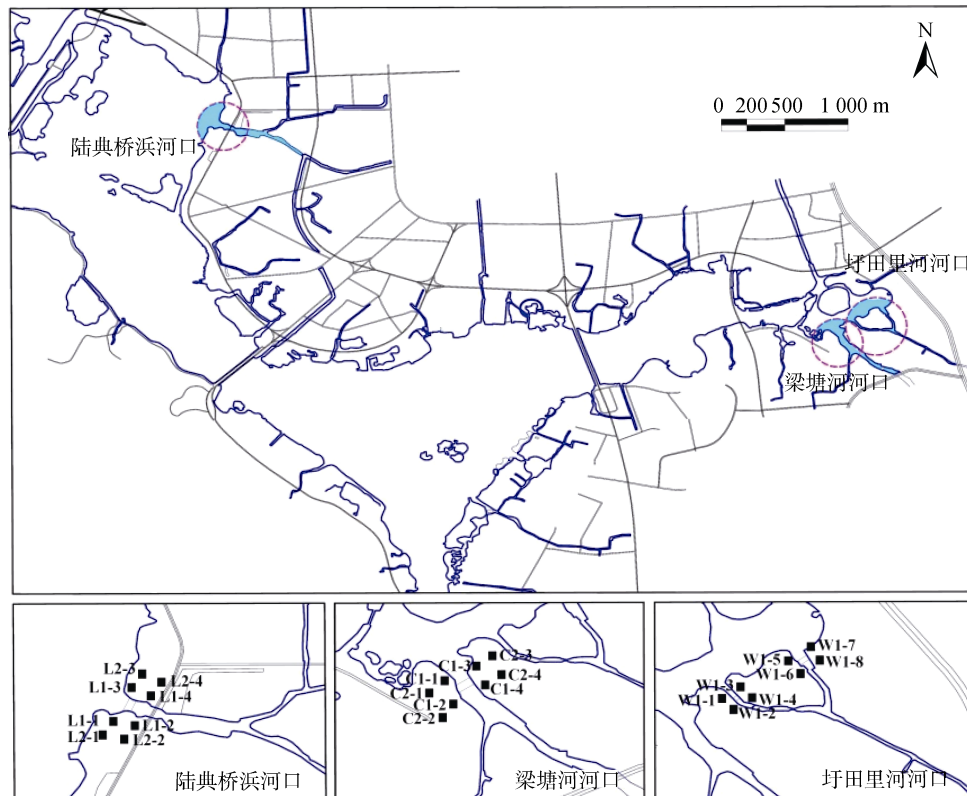


图 1 3 个河口所处位置和岸带土壤采样点位设置

Fig. 1 Locations of three studied estuaries and soil sampling points

1.2 样品采集与测定

于 2017 年 10 月分别对 3 个河口岸带的 24 个采样点进行土壤样品采集。为了减少天气的影响,采样

均在晴天进行,采样方式为在取样点位周围,先用土铲刮去土壤表层植被及枯枝落叶,然后用环刀进行容重取样,每两个取样点之间距离均大于 5 m。同时挖

取土壤表层 20 cm × 20 cm × 20 cm 小土方样本,带回实验室待测。

土壤物理性质测定参照《土壤物理性质测定法》^[13] :土壤容重(BD)的测定采用环刀法 ;土壤颗粒分级采用吸管法 ,土壤颗粒分级标准采用中国制(1987 年)^[14]。

土壤总孔隙度 (P_t) 通过计算法得出 ,计算公式为 :

$$P_t = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中 : P_t 为土壤总孔隙度 , % ; ρ_b 为土壤容重 , g/cm³ ; ρ_s 为土壤比重(用平均值 2.65 g/cm³ 计算) , g/cm³。

毛管孔隙度 (P_c) 计算公式为 :

$$P_c = \frac{W}{V} \times 100 \quad (2)$$

式中 : P_c 为土壤毛管孔隙度 , % ; W 为环刀内土壤所保持的水量(即烘干法^[13]测定的土壤含水量) , 相当于水的容积 , cm³ ; V 为环刀容积 , cm³。

非毛管孔隙度 (P_a) 计算公式为 :

$$P_a = P_t - P_c \quad (3)$$

式中 : P_a 为土壤非毛管孔隙度 , % ; P_t 为土壤总孔隙度 , % ; P_c 为土壤毛管孔隙度 , %。

土壤化学性质测定参照《土壤农业化学分析方法》^[15] : 土壤 pH 采用电极法 , 土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法 , 碱解氮(AN)采用碱解扩散法 , 全磷(TP)采用钼锑抗比色法 , 有效磷(AP)采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法 , 有机质(OM)采用油浴加热重铬酸钾氧化法。

1.3 土壤质量指数计算

采用加权法计算土壤质量的综合性指标值 , 以土壤质量指数 SQI(soil quality index)表示^[16] , 计算

公式为 :

$$SQI = \sum_{i=1}^n N_i W_i \quad (4)$$

式中 : N_i 表示第 i 种参评指标所对应的隶属度值 ; W_i 表示第 i 种参评指标所对应的权重值 ; n 为参评指标个数。本研究根据土壤质量评价参数选择的原则^[17] 及前人的研究资料^[18] , 结合适合岸带植物生长的土壤指标 , 选取了石砾、砂粒、黏粒、BD、pH、OM、TN、AN、TP、AP 作为土壤质量参评指标。

隶属度值的确定 : 根据植物效应曲线将隶属度函数分为 2 种类型(抛物线型和 S 型)^[19] , 石砾、砂粒、黏粒、BD、pH 等指标属于抛物线型隶属度函数 , 即式(5) ; 土壤 OM、TN、AN、TP、AP 等属于 S 型隶属度函数 , 即式(6)。本研究根据前人研究资料^[18] 及研究区土壤特征 , 确定了曲线中转折点的相应取值 , 详见表 2。由式(5)、式(6)和表 2 可求出各项指标的隶属度值 , 其介于 0.1 ~ 1.0 , 值越大表示该土壤越有利于植物生长。

$$f(x) = \begin{cases} 0.9 \times \frac{x-x_3}{x-x_3} + 0.1, & (x_3 < x \leq x_4) \\ 1.0, & (x_2 < x \leq x_3) \\ 0.9 \times \frac{x-x_1}{x_2-x_1} + 0.1, & (x_1 \leq x < x_2) \\ 0.1, & (x < x_1 \text{ 或 } x > x_4) \end{cases} \quad (5)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1.0, & (x_2 \leq x) \\ 0.9 \times \frac{x-x_1}{x_2-x_1} + 0.1, & (x_1 \leq x < x_2) \\ 0.1, & (x < x_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 : x 为参评指标实际取值 , x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别为曲线中转折点的相应取值(表 2)。

表 2 隶属度函数曲线转折点值
Table 2 Turning point values of membership function curves

转折点	石砾(g/kg)	砂粒(g/kg)	黏粒(g/kg)	BD(g/cm ³)	pH	OM(g/kg)	TN(g/kg)	AN(mg/kg)	TP(g/kg)	AP(mg/kg)
x_1	1	15	20	0.9	4.5	10	0.75	60	0.4	5
x_2	5	30	40	1.1	6.5	30	1.5	120	1	20
x_3	10	55	60	1.4	7.5					
x_4	30	80	80	1.8	8.5					

权重值的确定 : 各项参评指标的权重值采用主成分分析法来确定。首先计算出公因子方差 , 进一步求出各公因子方差占公因子方差总和的比例 , 将其作为单项评价指标的权重值^[16](表 3)。在归一化过程中 , 隶属度函数转折点的取值及权重的确定方法直接决

定最后结果。本研究在转折点的取值和评价因子的选取上主要以有利于植物生长为目的。

1.4 数据分析

用 SPSS 22.0 软件进行统计分析 , 用 Sigmaplot 12.0 软件完成制图工作。

表 3 参评指标权重值
Table 3 Weights of evaluation indexes

指标	石砾	砂粒	黏粒	BD	pH	OM	TN	AN	TP	AP
公因子方差	0.787	0.814	0.977	0.643	0.641	0.850	0.937	0.914	0.808	0.478
权重	0.089	0.092	0.111	0.073	0.073	0.096	0.106	0.104	0.092	0.054

2 结果与分析

2.1 土壤物理性状

研究区土壤的物理性质总体情况如表 4 所示。从土壤颗粒粒径来看,以圩田里河河口的石块含量最低,其次为梁塘河河口,陆典桥浜河口的石块含量最高;近岸点位 C1 高出远岸点位 C2 近 1 倍,近岸点位 L1 高出远岸点位 L2 44.6 g/kg;陆典桥浜河口的石块含量与圩田里河河口之间比较相差 4 倍 ~ 8 倍,差异显著($P=0.027$, 表 5)。研究区石砾含量在 571.1 ~ 650.5 g/kg,均大于 500 g/kg,陆典桥浜和梁塘河河口位置上均表现为远岸点位石砾含量略高于近岸点位。总体来看,公园化河口岸带土壤中石块和石砾平均总含量达到 700 g/kg 以上,土壤颗粒粒径较大。研究区域土壤粉粒含量较低,3 个区域平均含量为 26.9 g/kg。陆典桥浜河口的砂粒和黏粒含量相当,均约为 110 g/kg,砂粒含量在 L2 点位明显高于 L1 点位

($P=0.039$);梁塘河和圩田里河河口的砂粒含量均略低于黏粒含量,陆典桥浜和圩田里河河口之间黏粒含量差异显著($P=0.017$, 表 5)。

土壤容重(BD)和孔隙度均能反映土壤水气的状况,从表 4 可以看出,研究区土壤容重范围在 1.37 ~ 1.50 g/cm³,同一河口不同位置之间容重差异不显著,河口之间容重趋势为 L>W>C,陆典桥浜和梁塘河河口之间差异显著($P=0.019$, 表 5)。从土壤孔隙度上来看,研究区域 P_i 变化幅度不大,同一河口不同位置之间差异并不明显,陆典桥浜和梁塘河河口之间差异显著($P=0.018$, 表 5)。3 个河口的 P_c 和 P_a 均为 $P_a > P_c$,梁塘河和圩田里河河口的不同位置之间差异不显著。陆典桥浜河口的 P_c 和 P_a 表现为: P_c 在 L2(19.66%)要高于 L1(14.18%) P_a 在 L1(29.50%)要高于 L2(23.65%),且两个指标在陆典桥浜河口近岸和远岸点位之间差异显著($P_c: P=0.034; P_a: P=0.049$), P_a 在陆典桥浜和圩田里河河口之间有显著差异($W>L, P=0.036$, 表 5)。

表 4 研究区土壤的物理性状
Table 4 Statistical information of soil physical variables in three studied estuaries

指标	陆典桥浜河口(L)			梁塘河河口(C)			圩田里河河口(W)		
	L1	L2	P	C1	C2	P	WW	WE	P
石块(g/kg)	181.2 ± 230.6	136.6 ± 101.5	ns	147.7 ± 106.6	77.9 ± 51.9	ns	35.3 ± 31.8	22.4 ± 19.8	ns
石砾(g/kg)	571.1 ± 136.3	590.6 ± 107.9	ns	581.0 ± 61.6	610.1 ± 64.7	ns	637.0 ± 51.5	650.5 ± 13.8	ns
砂粒(g/kg)	93.2 ± 30.7	143.0 ± 22.0	0.039	112.4 ± 30.1	127.6 ± 25.3	ns	102.8 ± 17.9	125.8 ± 8.7	ns
粉粒(g/kg)	25.9 ± 11.4	27.6 ± 7.5	ns	28.2 ± 9.5	26.2 ± 7.2	ns	22.2 ± 7.8	31.5 ± 6.0	ns
黏粒(g/kg)	128.6 ± 89.9	102.3 ± 43.2	ns	130.8 ± 39.6	158.2 ± 61.2	ns	205.4 ± 59.7	169.7 ± 28.7	ns
BD(g/cm ³)	1.49 ± 0.07	1.50 ± 0.05	ns	1.38 ± 0.06	1.37 ± 0.05	ns	1.44 ± 0.05	1.44 ± 0.13	ns
P_i (%)	43.68 ± 2.59	43.30 ± 1.73	ns	47.59 ± 3.83	48.38 ± 2.95	ns	45.76 ± 4.07	45.76 ± 6.00	ns
P_c (%)	14.18 ± 2.92	19.66 ± 2.74	0.034	19.24 ± 4.17	17.26 ± 2.31	ns	14.26 ± 3.27	15.03 ± 5.13	ns
P_a (%)	29.50 ± 2.12	23.65 ± 4.27	0.049	28.35 ± 1.58	31.12 ± 3.38	ns	31.49 ± 4.07	30.72 ± 3.04	ns

注: ns 表示同一河口不同位置之间指标差异不显著。

2.2 土壤化学性状

研究区土壤的化学性质总体情况如图 2 所示。研究区域土壤的 pH 在 7.95 ~ 8.65,呈碱性,同一河口不同位置之间无显著差异,3 个河口土壤 pH 大小为 L>W>C,差异显著($P=0.014$, 表 5),其中,陆典桥浜和梁塘河河口之间存在极显著差异($P<0.01$, 表 5)。研究区土壤的 OM 平均含量为 21.93 g/kg,陆典桥浜

和梁塘河河口均表现为近岸点位 OM 含量高于远岸点位,且 C1 和 C2 之间差异显著($P < 0.05$)。从土壤氮磷含量上来看,陆典桥浜河口的土壤 TN 和 TP 均表现为 L1>L2,即近岸点位的土壤氮磷含量比远岸点位高,L1 和 L2 的 TN 分别为 1.39 g/kg 和 0.95 g/kg,TP 分别为 1.34 g/kg 和 0.96 g/kg。梁塘河河口土壤 TN 含量 C1(1.37 g/kg)>C2(0.84 g/kg),TP 含量则两个

表 5 河口之间土壤指标的差异显著性

Table 5 P-values of differences in soil variables among three studied estuaries

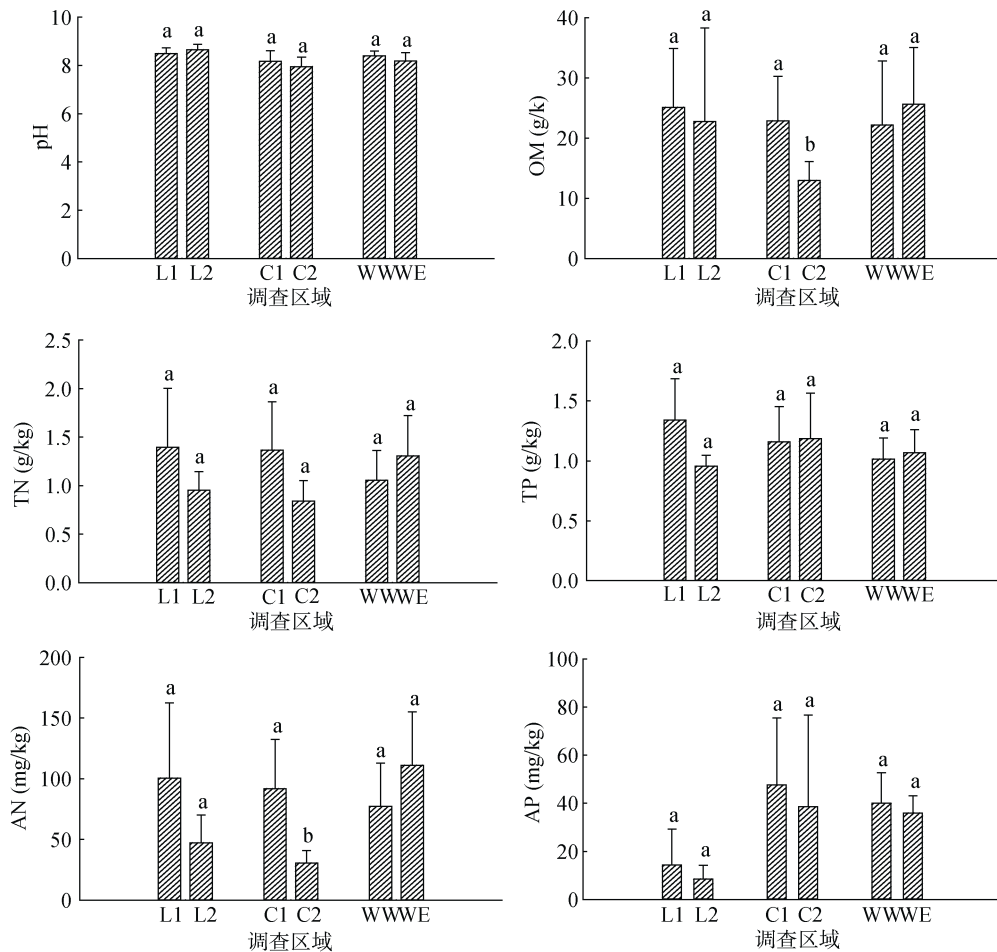
指标	L×C	L×W	C×W	L×C×W
石块(g/kg)	ns	0.027	ns	ns
石砾(g/kg)	ns	ns	ns	ns
砂粒(g/kg)	ns	ns	ns	ns
粉粒(g/kg)	ns	ns	ns	ns
黏粒(g/kg)	ns	0.017	ns	ns
BD(g/cm ³)	0.019	ns	ns	ns
P _i (%)	0.018	ns	ns	ns
P _c (%)	ns	ns	ns	ns
P _a (%)	ns	0.036	ns	ns
pH	0.004	ns	ns	0.014
OM(g/kg)	ns	ns	ns	ns
TN(g/kg)	ns	ns	ns	ns
AN(mg/kg)	ns	ns	ns	ns
TP(g/kg)	ns	ns	ns	ns
AP(mg/kg)	0.005	0.015	ns	0.010

注：ns 表示不同河口之间指标差异不显著。×表示某两个或三个河口间的差异显著性比较。

点位相差不大(分别为 1.16 g/kg 与 1.18 g/kg)。圩田里河河口的土壤 TN、TP 含量均表现为 WE>WW 的趋势。研究区土壤 AN 和 AP 平均含量分别为 76.45 mg/kg 和 30.81 mg/kg，陆典桥浜和梁塘河河口均表现为近岸含量高于远岸的趋势，且 AN 含量在 C1 和 C2 之间差异显著($P < 0.05$)。圩田里河河口中，土壤 AN 表现为 WE(111.13 mg/kg)>WW(77.18 mg/kg)，而 AP 趋势则相反(WW：40.00 mg/kg；WE：35.93 mg/kg)。3 个河口间土壤 AP 含量 C>W>L，除了 C 和 W 外，不同河口之间均达到差异显著水平($P < 0.05$ ，表 5)。

2.3 土壤质量指数

土壤质量指数(SQI)作为指示土壤条件差异及其动态变化的指标，能够综合反映土壤特性，体现自然因素及人为因素对土壤的影响^[19]。本研究筛选了与植物生长相关的 10 个关键土壤指标，包括砾石含量、砂粒含量、黏粒含量、BD、pH、OM、TN、TP、AN、AP，对研究区域进行 SQI 分析，结果如图 3 所示。3 个河口 SQI 范围在 0.21 ~ 0.67，其中 L、C 和 W 的



(图中不同字母表示同一河口不同点位在 $P < 0.05$ 水平上差异显著)

图 2 研究区域土壤 pH、OM、TN、TP、AN 和 AP 含量

Fig. 2 pH values and contents of OM, TN, TP, AN and AP in three studied estuaries

平均 SQI 分别为 0.35、0.39 和 0.47, 即土壤质量 $W>C>L$ 。从区域位置上看, 陆典桥滨和梁塘河口均表现为近岸土壤质量优于远岸的现象, 即近岸的土壤条件较远岸更有利于植物生长; 圩田里河河口的 SQI 值 $WW<WE$, 且 WW 重复之间差异较明显。

为了研究影响岸带土壤质量的主因子, 本研究采用逐步回归方法筛选出影响 SQI 的主要土壤指标(表 6), 结果表明, AN 对 SQI 贡献最大($R^2=0.808$,

$P<0.001$), 之后依次为 BD、OM、AP 和 pH, 逐步提高了 R^2 值, 5 个指标的 R^2 达 0.982。若利用该 5 个指标进行 SQI 计算(SQI_5), 则 SQI 与 SQI_5 之间的相关系数达 $R^2=0.9534$ (图 3), 即在筛选出的 10 个关键土壤指标中, AN、BD、OM、AP 和 pH 对岸带土壤质量的影响最大, 其中 AN、OM、AP 和 pH 反映了土壤提供养分和缓冲能力, BD 反映了水分的下渗、保持和通气能力^[20]。

表 6 SQI 与归一化后 10 个土壤指标的逐步回归公式
Table 6 Stepwise linear regressions of SQI with 10 soil variables after normalization

变量数	逐步回归公式	R^2	P
1	$SQI=0.272+2.999(AN)$	0.808	<0.001
2	$SQI=0.216+2.720(AN)+1.710(BD)$	0.900	<0.001
3	$SQI=0.178+1.853(AN)+1.659(BD)+1.391(OM)$	0.936	<0.001
4	$SQI=0.133+1.503(AN)+1.429(BD)+1.562(OM)+1.476(AP)$	0.968	<0.001
5	$SQI=0.125+1.430(AN)+1.097(BD)+1.689(OM)+1.177(AP)+0.777(pH)$	0.982	<0.001

注: $n=24$; SPSS 分析中自动剔除了砾石(为常数)。

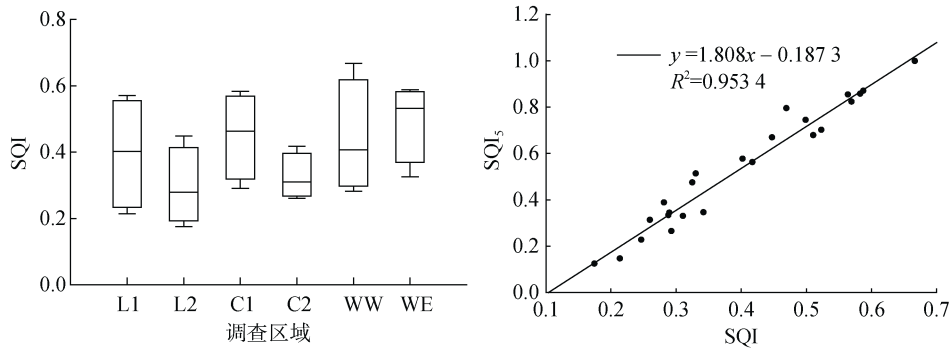


图 3 研究区的土壤质量指数(SQI)及其与 SQI_5 的相关性
Fig. 3 Soil quality indexes (SQIs) and their relationships with SQI_5

3 讨论

土壤的物理性状主要是指土壤容重、水分、通气性、热特性等^[21], 各因素之间互相影响、相互作用, 影响着土壤化学物质的转化和生物的活动情况, 表现出土壤化学性质的差异, 决定着土壤肥力转化的水平。本研究拟通过对滨湖城市公园化河口岸带土壤理化性状的测定, 以及影响植物生长的土壤质量的分析, 找出公园化河口岸带土壤现状问题所在, 为后期同类土壤修复工程提供理论依据。

3.1 三个公园化河口岸带的土壤物理特征和差异

土壤的颗粒结构影响着土壤中水、肥、气、热的存在状态和物质的转化过程, 是判断土壤质量非常重要的指标。根据中国制土壤颗粒分级标准(1987年), 当土壤中砾石含量超过 300 g/kg 以上时, 属于砾石土, 其中的水气交换及理化、生物反应已经大大改变,

其性态与传统意义上的土壤差异极大。研究表明, 砾石的存在及含量对径流入渗的影响较为复杂, 砾石覆盖及含量与入渗量之间既有正相关关系, 也有负相关关系, 这与土壤类型、砾石在土壤中的位置以及砾石附近的土壤孔隙类型等都有关^[22-24]。有研究认为, 在坡面土壤中嵌套于土壤内部的石砾会减小入渗量, 导致出现较大的径流与土壤侵蚀速率, 而分布于土壤表面的石砾可能增加也可能减小入渗量, 其对地表径流和土壤侵蚀的影响受到石砾粒径大小的影响^[23-24]。本研究中, 尽管研究区河口岸带土壤在河口间或近远岸之间存在着不同的颗粒含量, 但由于在所有采样点位的石块和石砾平均总含量均超过 700 g/kg, 显著大于砂粉、黏粒总含量, 且大部分石块和石砾嵌套于土壤内部, 导致土壤持水能力差, 已严重影响土壤的水气平衡, 此种结构不利于植物根系生长和微生物的活动^[25]。出现此现象的原因可能与两个公园在建

造过程中岸带土壤来源复杂、土层中掺杂着大量的建筑垃圾等有关,使得岸带土壤质地和结构较差。

土壤容重(BD)作为土壤物理性质的重要指标,其大小可反映土壤的松紧度、孔隙度、水分入渗率和持水力^[21]。一般情况下,土壤越疏松多孔,容重越小,土壤越紧实,容重越大^[26-27]。容重增大不利于地表径流的下渗和土壤中气体的流通,并间接影响土壤中物质转化和生物反应。伍海兵^[28]的研究表明,上海中心城区绿地土壤容重均值为 1.31 g/cm^3 ,符合《绿化种植土壤》标准(CJ/T 340—2011)^[29]中土壤容重小于 1.35 g/cm^3 的要求;容重过大,影响植物根系生长;容重达到 1.40 g/cm^3 是根系生长的限制值。在本研究中,研究区域各点位的容重均高于 1.35 g/cm^3 ,且陆典桥浜河口和圩田里河河口土壤的容重均超过了 1.40 g/cm^3 的根系生长限制值,不利于岸带植被生长,也影响了地表径流的入渗和壤中流的产生,增大了土壤侵蚀的可能性^[30-32]。容重值过大的原因既与岸带土壤中石砾含量高有关,又与采样点位距公园主干道较近、人为践踏导致土壤紧实程度升高有关。

土壤通气性是表征土壤透气性和土壤中氧含量的综合指标,也是表示土壤肥力的综合指标之一^[33]。土壤中的孔隙类型影响着水分在土表和土体内的迁移方式和途径,直接影响地表径流中物质转移的形式和速率^[27]。一般来说,良好土壤的总孔隙度(P_t)为 $50\% \sim 56\%$ ^[14],而城市绿地土壤均存在退化现象,比农林土壤总孔隙度低 $13\% \sim 52\%$ ^[28]。在本研究中,岸带土壤的总孔隙度均小于 50% ,水分和空气的交流受到了一定程度的限制。各河口岸带土壤毛管孔隙度(P_c)均小于 20% ,显著低于自然林地土壤的 $52.88\% \sim 61.09\%$ ^[34],非毛管孔隙度(P_n)均大于 25% ,超过了《绿化种植土壤》^[29]要求的 $5\% \sim 25\%$ 标准。3个河口岸带土壤孔隙度现状均达不到良好土壤性状的要求,影响了河口岸带的水分蓄积能力,降低了河口生态功能的发挥。研究表明^[35-36],降低容重,增加孔隙度可以增加土壤通透性,促进土壤团聚体的形成,可以提高水肥利用率,增加作物产量。因此,降低容重,增加孔隙度是改善土壤结构,协调土壤水气交流的关键,建议在公园化岸带土壤修复工程中应给予足够重视。

3.2 三个公园化河口岸带的土壤化学特征和差异

我国农田土壤趋于酸化^[37],而城市土壤则趋向碱性^[38]。本研究区域位于滨湖城市公园内,岸带土壤pH均在7.9以上,呈碱性,这可能与公园建设时土壤中混入建筑废弃物、砖头以及碱性混合物有关^[39]。在碱性条件下,土壤中的磷易与 Ca^{2+} 形成

$\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 等难溶性化合物,降低磷的移动性,同时,较高的pH条件不仅会抑制酸性和中性磷酸酶的活性,对碱性磷酸酶活性也有一定的抑制作用,限制难溶性磷向可溶性磷的转化^[40],有利于减少土壤中磷的流失。在本研究中,3个河口间土壤pH呈现 $L>W>C$ 的趋势,土壤有效磷(AP)趋势相反。这可能由于前面所述原因,pH影响着磷的转化过程,使得可溶性磷含量随pH增加而降低。

土壤有机质(OM)是土壤中各类反应的载体,在土壤团聚体的形成和稳定性方面起着重要作用。土壤有机质含量增加可提高团聚体稳定性,改善土壤结构,有利于土壤水分的渗透与蓄积,改善土壤通气性以及根系的生长环境^[41-43]。而土壤养分在河岸断面上的分布特征,不仅可以影响岸带植被的生长,也影响着养分的迁移与流失。在农田系统中,高水平的土壤养分含量有利于作物生长和获得较好的产量^[44-45],但在类似坡地的岸带土壤系统中,高土壤养分也意味着较高的养分流失风险。因此,在河岸带土壤系统中,如何协调养分含量与植物生长之间的关系,使之实现较好的动态平衡,是降低岸带土壤养分流失,建造良好岸带生态系统的关键。在本研究中,与农田土壤相比,研究区土壤中有有机质、全氮(TN)和碱解氮(AN)含量处于中等水平,全磷(TP)和有效磷(AP)含量属于较高水平(第二次土壤普查养分分级标准)。除梁塘河河口土壤全磷含量差异不大外,陆典桥浜和梁塘河河口土壤的有机质、全氮、碱解氮、有效磷含量均呈现近岸大于远岸的趋势。这与前人报道的下坡位土壤养分含量普遍比上坡位和中坡位高的结论^[20,45-46]一致。分析原因可能是,随着雨水的冲刷,枯枝落叶、有机体、养分丰富的表土随径流自上而下流动,营养物质也随之在近岸区累积。近岸土壤随河水潮汐变化干湿交替明显,这样的环境为土壤中微生物生长和物质转化提供了便利条件。经过长期不断的微生物分解,物质的转化和养分的累积,形成了近岸土壤养分高于远岸的状况。

在本研究中,圩田里河河口两个分支之间均为近岸点位,土壤化学性状差异不显著。另外,梁塘河河口和圩田里河河口岸带土壤在理化指标上差异也均不显著,这可能与二者距离较近,均位于金城湾公园内,初期的建造条件和后期管理方式比较相似有关。

3.3 三个公园化河口岸带的土壤质量状况

岸带植被对地表径流中污染物的拦截起重要作用,可以有效滞缓径流,并且截留或吸附氮磷等污染物^[47]。为了探索岸带土壤条件是否有利于植被生长,

本研究进行了土壤质量 SQI 评价, SQI 越接近于 1, 说明土壤状况越利于植物生长^[16]。本研究中, 3 个河口的 SQI 均在 0.5 以下, 说明研究区域的土壤质量状况均比较差, 存在土壤质量退化的现象。与远岸点位相比, 研究区域近岸点位的 SQI 较高, 即近岸较远岸更有利于植物生长。3 个河口区域相比较, 圩田里河河口的 SQI(0.47)最大, 这可能与该河口点位选取均在近岸有关; 另外, 梁塘河河口的 SQI(0.39)也比陆典桥浜河口(0.35)的大, 说明金城湾公园河口的岸带土壤整体状况要优于渔夫岛绿地公园, 更有利于植物的生长, 分析原因, 可能与公园建设过程中岸带土壤来源不同, 或公园后期管理等因素有关。综合分析, 该区域的土壤修复可以从降低容重、增加孔隙度入手, 充分利用适宜植物生长的近岸土壤条件进行辐射修复, 同时加强后期管护的力度和科学性。

另外, 本研究在逐步回归分析基础上, 选取了对研究区域土壤质量影响最大的碱解氮、容重、有机质、有效磷和 pH 等 5 个指标进行 SQI₅ 计算, 结果与 SQI 显著相关($R^2=0.9534$), 今后对研究区域岸带土壤质量测定时, 该 5 项指标就能代替计算 SQI 所用的 10 个指标, 使得计算更简单, 工作量更小。

4 结论

1) 研究区五里湖 3 个公园化河口岸带土壤主要以石块和石砾为主(700 g/kg 以上), 砂粒、粉粒和黏粒含量较低; 与绿化种植土壤相比, 岸带土壤容重偏大、孔隙度偏低, 影响土壤水气平衡, 不利于地表径流的入参与植物生长。

2) 3 个公园化河口岸带土壤均呈碱性, 与城市土壤 pH 变化趋势一致, pH 呈现陆典桥浜河口>圩田里河河口>梁塘河河口的趋势, 有效磷含量趋势相反。与农田土壤相比, 研究区域土壤有机质、全氮、碱解氮含量处于中等水平, 全磷和有效磷含量属于较高水平。陆典桥浜和梁塘河河口的土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷含量以及陆典桥浜河口土壤的全磷含量均呈现近岸点位高于远岸点位的趋势。

3) 研究区 3 个典型公园化河口岸带均存在土壤退化的现象, SQI 均小于 0.5, 土壤质量状况较差, 土壤条件未达到植物生长的最佳状态。近岸点位与远岸相比 SQI 较高, 较适合植物生长。

参考文献:

[1] Davoodi H, Gharibreza M, Negarestan H, et al. Ecological risk assessment of the Assaluyeh and Bassatin estuaries

(northern Persian Gulf) using sediment quality indices[J]. *Estuarine coastal and shelf science*, 2017, 192(5): 17–28

[2] 叶春, 李春华, 吴蕾, 等. 湖滨带生态退化及其与人类活动的相互作用[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 401–407

[3] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英, 等. 上海中心城区公园土壤肥力特征分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(5): 20–26

[4] 庞学勇, 包维凯, 江元明, 等. 九寨沟和黄龙自然保护区原始林与次生林土壤物理性质比较[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(6): 768–773

[5] 赵鹏, 胡艳芳, 林峻宇. 不同河岸带修复策略对氮磷非点源污染的净化作用[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(7): 2160–2170

[6] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: Why and how? [J]. *Geoderma*, 2003, 114(3/4): 145–156

[7] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 901–913

[8] 袁勇, 李小英. 森林类型自然保护区土壤养分综述[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(5): 75–82

[9] Hu Y, Wang L, Tang Y, et al. Variability in soil microbial community and activity between coastal and riparian wetlands in the Yangtze River estuary-potential impacts on carbon sequestration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 221–228

[10] 巩文雯, 于晓东, 韩平, 等. 北京市公园土壤黑碳含量特征及来源分析[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1795–1800

[11] 无锡市志办公室. 无锡年鉴[M]. 北京: 地方志出版社, 2017: 503–505

[12] Wang J L, Fu Z S, Qiao H X, et al. Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1392–1402

[13] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 78–83

[14] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 69–96

[15] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12, 106–108, 146–185

[16] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 90(1): 25–45

[17] 沈汉. 土壤评价中参评因素的选定与分级指标的划分[J]. *华北农学报*, 1990, 5(3): 63–69

[18] 袁勇, 熊东红, 校亮, 等. 元谋干热河谷冲沟不同部位土壤质量评价[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(10): 2165–2172

[19] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362–369

[20] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(1): 67–72

[21] 官亮, 安景文, 邢月华, 等. 连年深松和施用有机肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(6): 1092–1099

- [22] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 59–68
- [23] Deecmix L, Viramontes D, Vauclin M. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango Northwest Mexico) [J]. *Catena*, 2001, 43: 115–135
- [24] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration[J]. *Catena*, 1994, 23: 99–110
- [25] 马方, 陈中玉. 多石农田除石的必要性分析[J]. *吉林农业*, 2010, 246(8): 98–99
- [26] 郭培俊, 艾应伟, 陈朝琼, 等. 植生土类型对岩石边坡人工土壤理化性质和微生物活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 203–208
- [27] 王璐, 仲启铖, 陆颖, 等. 群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 638–647
- [28] 伍海兵. 上海中心城区典型绿地土壤物理性质特征研究[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 155–161
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤: CJ/T 340—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- [30] 刘小梅, 吕殿青. 土壤容重对红壤坡地降雨侵蚀和入渗的影响[J]. *长江大学学报*, 2013, 27(2): 13–18
- [31] 郑世清, 周佩华. 土壤容重和降雨强度与土壤侵蚀和入渗关系的定量分析[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988(7): 53–56
- [32] 吉恒莹. 土壤质地层状性和水质对土壤侵蚀影响的试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017
- [33] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 297–308
- [34] 杜阿朋, 于澎涛, 王彦辉, 等. 六盘山北侧叠叠沟小流域土壤物理性质空间变异的研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(5): 547–554
- [35] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2187–2193
- [36] 刘志鹏, 徐杰男, 余冬立, 等. 添加生物质炭对土壤热性质影响机理研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 933–944
- [37] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1010
- [38] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究[J]. *土壤*, 2001, 33(1): 47–51
- [39] 刘庚, 任军, 胡长群, 等. 长春市高新北市绿地土壤质量分析[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2017, 49(1): 120–124
- [40] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶的测定方法探讨[J]. *土壤通报*, 1986, 17(3): 138–141
- [41] 邱传明. 土壤有机质提升技术[J]. *土壤与肥料*, 2019(5): 69–71
- [42] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 96–105
- [43] Felde V J M N L, Drahorad S L, Felix-Henningsen P, et al. Ongoing oversanding induces biological soil crust layering—a new approach for biological soil crust structure elucidation determined from high resolution penetration resistance data[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 250–264
- [44] 段英华, 卢昌艾, 杨洪波, 等. 长期施肥下我国灌淤土粮食产量和土壤养分的变化[J]. *植物营养与肥料学报* 2018, 24(6): 1475–1483
- [45] 杨畅, 张树兰, 杨学云. 长期施肥对壤土冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(2): 402–408
- [46] 薛海龙, 许文年, 刘大翔. 两种边坡生态修复模式土壤肥力与酶活性的变化[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 182–192
- [47] 褚利平, 王克勤, 宋泽芬, 等. 烤烟坡耕地壤中流氮、磷浓度的动态[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1346–1354
- [48] 余冬立, 阿力木·阿布拉提, 陈倩, 等. 不同入流条件下植被过滤带对坡面径流氮、磷的拦截效果[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3425–3432

Study on Soil Physiochemical Properties in Typical Parkization Estuaries of Lakeshore City

QIAO Hongxia¹, JIANG Yuan², FU Zishi¹, WANG Junli¹, ZHANG Lei¹, LIU Fuxing^{1*}

(1 *Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China*; 2 *Wuxi Hengcheng Water Conservancy Engineering Construction Co., Ltd. Wuxi, Jiangsu 214000, China*)

Abstract: 24 soil samplings were selected from three typical parkization estuaries (Ludianqiaobang, Liangtanghe and Weitianlihe) around Wuli Lake in Oct. 2017, and gravel, soil texture composition, bulk density (BD), porosity (P_t), pH, organic matter (OM), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and soil quality index (SQI) were analyzed or calculated. The results showed that the pedons in the three estuaries were all dominated by rocks and gravel (>700 g/kg), soil bulk density was larger (>1.35 g/cm³) and soil porosity was low ($<50\%$), which indicate the soils are poor in infiltration and easy to occur surface runoff. The soils in the three estuaries were all alkaline with an average pH of 8.30, and pH value was in an order of Ludianqiaobang $>$ Wutianlihe $>$ Liangtanghe, while AP was opposite. Except for TP content in Liangtang, the near-shore soils generally had higher contents of OM, TN, AN, AP, and TP than those of the far-shore soils in Ludianqiao and Wutianli. The soil qualities of the three estuaries were all poor (SQI $<$ 0.5), uncondusive to plant growth, and AN, BD, OM, AP and pH were the main factors affecting soil quality. The above results provide references for soil remediation in the parkization estuaries around Wuli Lake and the other similar areas.

Key words: Estuary; Lakeshore zone; Soil; Physiochemical properties; SQI