

艾比湖流域风沙土盐分特征分析

郭双双^{1,2},王勇辉^{1,2}

(1.新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830054; 2.新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要:以艾比湖流域风沙土土壤为研究对象,对不同植被类型覆盖条件下土壤总盐含量、可溶性离子等指标进行测定,通过相关性分析以及主成分分析,确定土壤盐分特征。结果表明:研究区不同植被覆盖下的风沙土土壤盐分含量较高,差异较大,总盐含量呈现强烈的空间变异特征;土壤中总盐含量与 Cl^- 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 及 SO_4^{2-} 含量之间存在极显著的正相关关系,总盐含量与 HCO_3^- 的相关性最弱;土壤中阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 为主,据主成分分析结果将其确定为盐渍化的特征因子。研究区风沙土盐渍化类型以氯化物-硫酸盐型和硫酸盐型为主,判断该区域风沙土的盐渍化类型为盐土。

关键词:艾比湖;土壤盐分;相关性;主成分分析

中图分类号: P934 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)05-0196-04

Salinity analysis of sandy soil in Ebinur Lake basin

GUO Shuang-shuang^{1,2}, WANG Yong-hui^{1,2}

(1. Xijiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

2. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: Using the sandy soil from Ebinur Lake basin as study object, the contents of soil total salt and soluble ions under different conditions of vegetation coverage were measured, and the characteristics of soil salinity were evaluated by the methods of correlation analysis and principal component analysis. The results showed that the total salt content of sandy soil was high and quite different among sampling areas, so it showed an extremely strong spatial variability. The total salt content was positively correlated with the contents of Cl^- , $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ and SO_4^{2-} at extremely significant level, but it was less correlated with the content of HCO_3^- . The main anions in sandy soil were Cl^- and SO_4^{2-} and the main cations were $\text{K}^+ + \text{Na}^+$, so they were judged to be the characteristic factors of salinization according to principal component analysis. The salinization types of sandy soil were mainly chloride-sulfate type and sulfate type.

Keywords: Ebinur Lake; soil salinity; correlation analysis; principal component analysis

土壤盐渍化过程强烈制约生物生产量,降低生物种群和生态系统的多样性,产生区域植被退化、土地荒漠化等一系列环境问题^[1]。据估计,全球已有近 $9\,155 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的土壤受到不同程度的盐渍化危害,占陆地面积的 71.26%^[2]。我国约有 250 多万 hm^2 的各种盐渍土壤,而且还有逐年上升趋势^[3]。此外,土壤综合肥力的空间分布与当地地貌特点,以及土壤和植被的地带性分布表现出很好的一致性,而土壤含盐量是荒漠植被分异的重要因素之一^[4],因此,分析了解土壤盐渍化的过程和特征是改善和恢复生态环境的重要内容之一。分析盐渍化区域盐分特征,对治理和预防土壤盐渍化至关重要^[5]。新疆诸多学者进行了盐分的空间变异特征研究,如古丽娜尔·托合提等在 GRS 和 GIS 技术支持下,通过地统计学的半变异函数和 Kriging 空间插值,以察布查尔县为例,定量分析伊犁河谷不同层次土壤盐分的空间异质性^[6];夏军等以玛纳斯河流域中下游三种典型地貌的盐渍土为研究对象,对该区盐渍土进行分类和空间变异性研究^[7];阿布都热合曼·哈力克在 GIS 技术支持下,通过地统计学半变异函数和

收稿日期:2013-03-26
基金项目:新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室开放基金:艾比湖干涸湖底起沙过程的表层土壤结构特征研究(XJDX0909-2012-10);国家自然科学基金:艾比湖湿地生态环境演变及生态恢复研究(41171036)
作者简介:郭双双(1989—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事干旱区资源利用的相关研究。E-mail: guoshuangshuang@163.com。
通信作者:王勇辉(1977—),男,新疆奎屯人,讲师,主要从事干旱区资源利用与环境演变的研究。E-mail: wyhsd_3011@163.com。

Kriging 空间插值,定量分析了岳普湖县不同层次土壤盐分的空间异质性^[8],他们分别得出不同地区的盐分空间变异状况,为新疆不同地区的盐渍化防治与治理提供依据。也有学者对不同地区土壤含盐量及土壤离子之间的关系进行了研究,如古丽格娜·哈力木拉提等运用相关分析法与主成分分析法分析了喀什葛尔河流域盐渍化土壤盐分特征^[5];祖皮艳木·买买提等利用化学分析和地统计学法,分析了研究区地下水以及土壤盐分含量、离子组成特征及其分布规律^[9];赵枫、金海龙对新疆艾比湖湿地国家级自然保护区阿其克苏河东大桥管护站至塌桥子管护站 15 km 处进行了盐分分析^[10],得出不同研究区域内盐分离子之间关联性及分布特征。

上述学者针对新疆不同区域的土壤进行了土壤盐分研究,没有对具体的土壤类型作深入研究。新疆风沙土所占面积较大,防沙治沙为当今新疆环境研究的热点;艾比湖湿地作为国家级自然保护区,位于阿拉山口的风道区,由于水土流失,生态环境脆弱,土壤易受大风侵蚀演变为沙化土壤,因此防止土地沙化与盐渍化显得尤为重要。本研究以艾比湖不同植被覆盖下的风沙土为研究对象,分析了艾比湖流域风沙土的盐渍化成因、土壤总盐状况及可溶性离子组成,找出盐渍化的主导因子,为艾比湖沙化研究及盐渍化的防治提供依据。

1 研究区概况

艾比湖流域地理位置介于东经 79°53′~85°02′,北纬 43°38′~45°52′,流域地跨博尔塔拉蒙古自治州的博乐市、温泉县和精河县,塔城地区的乌苏和托里县南部,伊犁直属的奎屯市和克拉玛依的独山子区。流域面积 50 621 km²,其中山地面积 24 317 km²,平原区面积 25 762 km²,湖泊面积 542 km²。艾比湖湿地位于博尔塔拉州境内,是准噶尔盆地西部最低洼地和水盐的汇集中心。东西长 102.63 km,南北宽 72.3 km,总面积 2 670.85 km²。日照时数约 2 800 h,年均温 6℃~8℃,月最高气温 28℃,最低气温低于 -17℃,年温在 -36.4℃~42.2℃之间。年均降水 90.9 mm,蒸发量高达 3 790 mm,属典型的大陆性干旱气候。湿地补给河流主要有博尔塔拉河、精河、阿奇克苏河、奎屯河等。因湿地位于阿拉山口大风通道上,保护区年均风速 6 m·s⁻¹,年均大风(>17 m·s⁻¹)日数高达 165 d,最大风速达 55 m·s⁻¹,集中在 4~6 月。这种特殊的地理位置及典型的干旱区气候特征,形成了盐湖、沼泽、滩涂、石漠、砾漠、土漠

等多种地形,且土壤质地较粗,多为粗砂。植被也由此形成旱生、超旱生、盐生、沙生等多种植物群落^[11],典型的地带性土壤为灰漠土、灰棕漠土和风沙土,隐域性土壤为盐泽土和草甸土。

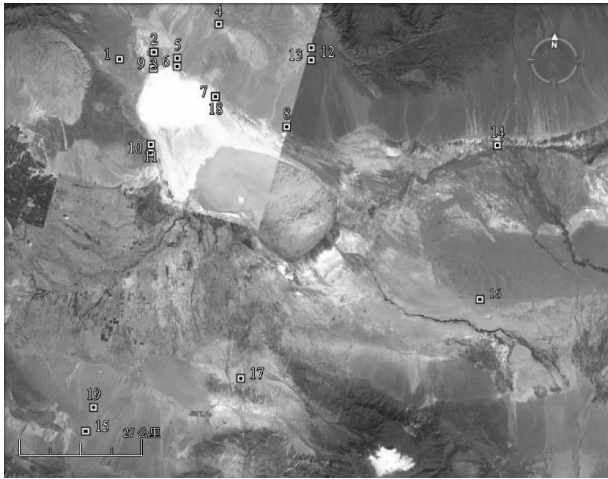


图 1 研究区采样点分布

Fig.1 Sampling points in study area

2 土壤样品采集与测试

土壤样品采集时间为 2011 年 11 月 1—2 日,利用 GPS 野外导航,在不同植被覆盖的风沙土区域随机采样,采样层次为上层(0~30 cm)和下层(30~50 cm),同时采集平行样品一份。样品风干过筛后用于土壤盐分指标的测定,并利用水质简分析方法测定 1:5 土壤水浸出液的易溶盐的含量(即土壤含盐量,文中用 S_s 表示)、主要离子(Na⁺+K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻)含量。数据处理采用软件为 Excel 及 SPSS17.0。

3 结果与分析

3.1 艾比湖流域风沙土壤盐分描述性特征

土壤溶液中各盐基离子(8 大离子)之和称为土壤总盐量,它表示土壤含盐量的大小及盐渍化水平的高低^[12]。通过描述统计土壤盐分特征,有利于定量反映研究区土壤盐分的变化特征^[13-15]。表 2 是对各个采样点上、下层土壤进行的描述性统计结果:从均值可得,总盐及 8 大离子含量都呈现上层含量大于下层含量的特点;从标准差分析,与土壤上下层变化相比,土壤上层含量变化较大,表明同一土质不同植被下的土壤盐分含量差距较大;从变异系数看,变异系数值大多都大于 1,属于强烈的空间变异特征。

表 1 采样点及地表植被
Table 1 Sampling points and the vegetation

采样序号 Sampling code	纬度 Latitude	经度 Longitude	地貌特征及主要植被 Geomorphological features and main vegetation
1	45°08.497′	82°31.970′	阿拉山口西侧戈壁,主要植被为麻黄
2	45°09.525′	82°37.786′	山前平原,主要植被为梭梭
3	45°09.524′	82°37.770′	干涸湖底滩涂,主要植被为梭梭
4	45°13.063′	82°48.893′	玛衣尔山前,主要植被为梭梭
5	45°08.862′	82°41.869′	干涸湖底滩涂,主要植被为怪柳
6	45°07.862′	82°41.889′	干涸湖底滩涂,主要植被为盐节木
7	45°04.315′	82°48.620′	湖底无植被
8	45°00.852′	83°01.011′	艾比湖西北滨湖区,主要植被为梭梭
9	45°07.542′	82°37.803′	干涸湖底滩涂,主要植被为假木贼
10	44°57.310′	82°37.714′	干涸湖底滩涂,主要植被为戈壁藜、木蓼
11	44°58.328′	82°37.744′	干涸湖底滩涂,主要植被为骆驼蓬等短命植物
12	45°10.447′	83°04.913′	玛衣尔山南坡,主要植被为木本猪毛菜
13	45°08.973′	83°04.953′	玛衣尔山南坡,主要植被为绢蒿
14	44°59.188′	83°37.260′	甘家湖东侧平原,主要植被为小叶碱蓬
15	44°23.414′	82°28.347′	山前丘陵,主要植被为琵琶柴
16	44°40.474′	83°34.701′	阿奇克苏河河岸带,主要植被为梭梭
17	44°30.320′	82°54.274′	精河林场,主要植被为琵琶柴、梭梭
18	45°04.315′	82°48.620′	湖底无植被
19	44°26.306′	82°29.459′	山前丘陵,主要植被为木蓼

表 2 土壤层盐分描述统计特征值
Table 2 The descriptive statistical characters of soil salinity

土壤盐分 Soil salinity		极小值 Max	极大值 Min	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
总盐/(g·kg ⁻¹) Total salt	上层 Upper layer	1.24	614.60	61.85	156.12	2.52
	下层 Lower layer	1.45	39.98	12.56	12.68	1.01
CO ₃ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.06	0.36	0.10	0.09	0.95
	下层 Lower layer	0.06	0.09	0.06	0.01	0.12
HCO ₃ ⁻ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.07	29.64	2.14	7.61	3.56
	下层 Lower layer	0.07	0.29	0.15	0.06	0.42
Cl ⁻ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.07	59.81	7.64	16.00	2.09
	下层 Lower layer	0.06	14.02	2.52	3.73	1.48
SO ₄ ²⁻ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.08	246.85	21.05	62.99	2.99
	下层 Lower layer	0.06	14.02	2.52	3.73	1.48
Ca ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.13	17.73	3.98	5.20	1.31
	下层 Lower layer	0.13	4.75	1.63	1.69	1.04
Mg ²⁺ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.05	3.49	0.61	0.95	1.54
	下层 Lower layer	0.05	0.92	0.32	0.26	0.83
K ⁺ ,Na ⁺ /(g·kg ⁻¹)	上层 Upper layer	0.08	295.75	26.33	75.60	2.87
	下层 Lower layer	0.19	17.48	4.33	5.34	1.23

不同植被覆盖下的风沙土总盐含量有很大差异,同时也说明不同植被耐盐性能的差异,其中梭梭的耐盐性最强,其次为盐节木,戈壁藜、木蓼的耐盐性最弱,其余植被的总盐含量没有明显区别。

3.2 艾比湖采样区风沙土土壤离子主成分分析

运用主成分分析法对风沙土特性及盐离子分布可作定性描述,找出具有代表性的主导因子,此外从

多个变量中构建相互独立的综合变量,可对土壤状况做出评价。各主成分中指标系数、特征值及贡献率,按照累计贡献率达到 80% 确定主成分个数,并计算主成分与各项指标的相关系数。各主成分因子的方差贡献率及其累积贡献率见表 3,方差贡献率越大,越能代表盐基离子的信息,主成分一的方差贡献率为 61.387%,反映盐基离子的大部分信息,主

成分二则是主成分一以外最能反映盐基离子信息,方差贡献率为 85.445%,保持了原变量信息的绝大部分,是反映土壤环境的重要指标。

方差贡献率为 24.085%,主成分一与主成分二累积

表 3 主成分因子的方差矩阵

Table 3 Covariance matrix of the principal component factors

成份 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			提取平方和载入 After extracting and loading square sum			
	合计 Total	贡献率 Variance/%	累积% Accumulation	合计 Total	贡献率 Variance/%	累积% Accumulation	
1	4.297	61.387	61.387	4.297	61.387	61.387	
2	1.684	24.058	85.445	1.684	24.058	85.445	
3	0.634	9.055	94.500	—	—	—	

从主成分载荷矩阵表 4 可以得出,第一主成分与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 呈现显著正相关,相关系数分别为 0.916、0.877、0.886;在第二主成分中, HCO_3^- 的贡献较高,相关系数为 0.914;说明该主成分在第一主成分的基础上进一步反映了土壤盐渍化所受 HCO_3^- 的影响。因此前 2 个主成分代表了较高的信息量(累计贡献率达 85.445%),这 2 个变量可代替原来的 8 个变量。将得到的因子负荷量与标准化后的数据相乘,就可以得出风沙土土壤环境主成分表达式:

$$Y_1 = 0.808X_1 + 0.185X_2 + 0.916X_3 + 0.877X_4 + 0.741X_5 + 0.819X_6 + 0.886X_7$$

$$Y_2 = 0.448X_1 + 0.914X_2 - 0.320X_3 - 0.368X_4 + 0.513X_5 - 0.043X_6 - 0.329X_7$$

式中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别为标准化后的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量, Y_1 、 Y_2 表达式中各指标系数的大小反映该指标对各主成分的贡献大小,在第 1 主成分的表达式中,第 3、4 项影响较大,其次是第 6、7 项的影响较大;第二主成分中第 2 项影响最大,因此可将 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 作为该地域土壤盐渍的主要因子。

表 5 新疆盐渍化分类和分级标准

Table 5 Types and classification criterion of soil salinization in Xinjiang

盐渍化类型判断 Type of salinization		盐渍化程度判断 Classification of salinization				盐土判断 Saline judgment
判断标准 Criterion $\text{Cl}^-/(2\text{SO}_4^{2-})$	盐渍化类型 Type	极轻盐渍化 Very slight	轻盐渍化 Slight	中度盐渍化 Moderate	强盐渍化 Serious	盐土标准 Saline criterion
> 2.00	氯化物型 Chloride type	< 0.15	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	> 0.80
1.00 ~ 2.00	硫酸盐 - 氯化物型 Sulfate - chloride type	< 0.20	0.20 ~ 0.30	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	> 1.00
0.20 ~ 1.00	氯化物 - 硫酸盐型 Chloride - sulfate type	< 0.25	0.25 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	0.70 ~ 1.20	> 1.20
< 0.20	硫酸盐型 Sulfate type	< 0.30	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	1.00 ~ 2.00	> 2.00

注:分级标准来自《新疆农业技术手册》。
Note: The classification criterion is quoted from ‘Xinjiang Agricultural Technical Manual’.

表 4 主成分的因子载荷矩阵

Table 4 Loading matrix of the principal component factors

土壤盐分 Soil salinity	主成分一 Component 1	主成分二 Component 2
CO_3^{2-}	0.808	0.448
HCO_3^-	0.185	0.914
Cl^-	0.916	- 0.320
SO_4^{2-}	0.877	- 0.368
Ca^{2+}	0.741	0.513
Mg^{2+}	0.819	- 0.043
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	0.886	- 0.329
方差贡献 Contribution of variance	5.2320	0.8150
特征根 Eigenvalues	5.2320	0.8150

3.3 艾比湖流域风沙土土壤盐渍化评价

研究区风沙土土壤以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为总盐的主要因子。其中 9 个样点盐渍化类型为氯化物 - 硫酸盐型,从盐渍化程度分析,7 各样点属中度盐渍化,2 个样点属重度盐渍化,8 个样点的盐渍化类型为硫酸盐型,盐渍化程度属极轻盐渍化,所以采样区风沙土盐渍化类型以氯化物 - 硫酸盐型和硫酸盐型为主。盐渍化程度以极轻盐渍化和中度盐渍化为主。

[5]

González A, Ayerbe L. Effect of terminal water stress on leaf epicuticular wax load, residual transpiration and grain yield in barley[J]. Euphytica, 2010,172(3):341-349.

[6]

郭彦军,倪 郁,郭芸江,等. 水热胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质组分及生理指标的影响[J]. 作物学报,2011,37(5):911-917.

[7]

Premachandra G S, Saneoka H, Kanaya M, et al. Cell membrane stability and leaf surface wax contents as affected by increasing water deficits in Maize[J]. Journal of Experimental Botany, 1991,42(2):167-171.

[8]

Jetter R, Schaffer S. Chemical composition of the Prunus laurocerasus leaf surface. Dynamic changes of the epicuticular wax film during leaf development[J]. Plant Physiology, 2001,126(3):1725-1737.

[9]

黄 玲,张正斌,崔玉亭,等. 小麦叶片蜡质含量与水分利用效率和产量的关系[J]. 麦类作物学报,2003,23(3):41-44.

[10]

张正斌,山 仑. 小麦抗旱生理指标与叶片卷曲度和蜡质关系研究[J]. 作物学报,1998,24(5):608-612.

[11]

Ristic Z, Jenks M A. Leaf cuticle and water loss in maize lines differing in dehydration avoidance[J]. Plant Physiol, 2002,159:645-651.

[12]

Goodwin S M, Jenks M A. Plant cuticle function as a barrier to water loss[C]//Jenks M A, Hasegawa P M. Plant Abiotic Stress. Oxford: Blackwell, 2005.

[13]

Vogg G, Fischer S, Leide J, et al. Tomato fruit cuticular waxes and the effect on transpiration barrier properties: functional characterization of a mutant deficient in a very-long-chain fatty acid β -ketoacyl-CoA synthase[J]. J Exp Bot, 2004,401:1401-1410.

[14]

Kim K S, Park S H, Jenks M A. Changes in leaf cuticular waxes of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants exposed to water deficit[J]. Journal of Plant Physiology, 2007,164:1134-1143.

[15]

Seo P J, Lee S B, Suh M C, et al. The MYB96 transcription factor regulates cuticular wax biosynthesis under drought conditions in Arabidopsis[J]. Plant Cell, 2011,23(3):1138-1152.

[16]

Leide J, Hildebrandt U, Vogg G, et al. The positionalsterile (ps) mutation affects cuticular transpiration and wax bio-synthesis of tomato fruits[J]. J Plant Physiol, 2011,168(9):871-877.

[17]

颜世文,倪宏涛,冷艳华. 不同抗感灰斑病品种叶片蜡质含量、叶比重的比较研究[J]. 种子世界,2001,(2):24-25.

[18]

郭彦军,倪 郁,郭芸江,等. 空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响[J]. 生态学报,2011,31(18):5273-5280.

[19]

张海禄,齐军仓,王祥军. 干旱胁迫对大麦叶片表皮蜡质含量及主要生理指标的影响[J]. 麦类作物学报,2012,32(2):280-283.

[20]

王振华,张喜英,陈素英,等. 不同年代冬小麦品种产量性状和生理生态指标差异分析[J]. 中国生态农业学报,2007,15(3):75-79.

(上接第 199 页)

4 结 论

- 1) 艾比湖流域风沙土全盐含量呈现表层富集现象,其中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量高于其它水溶性离子含量;
- 2) 相关性分析结果显示:总盐含量与 Cl^- 、 K^+ + Na^+ 及 SO_4^{2-} 含量具有强相关性;总盐含量与 HCO_3^- 的相关性最弱;
- 3) 主成分分析结果表明: Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ + Na^+ 是研究区盐渍化状况的特征因子。
- 4) 研究区风沙土盐渍化类型以氯化物 – 硫酸盐型和硫酸盐型为主。

参 考 文 献:

[1]

吉力力·阿不都外力,徐俊荣,穆桂金,等. 艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响[J]. 冰川冻土,2007,29(6):928-939.

[2]

关元秀,刘高焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述[J]. 遥感技术与应用,2001,16(1):40-44.

[3]

石玉林. 西北地区土地荒漠化与水资源利用研究[M]. 北京:科学出版社,2004:335.

[4]

毋兆鹏. 博尔塔拉河、精河流域绿洲土壤异质性及其驱动力研究[J]. 土壤通报,2010,41(1):81-86.

[5]

古丽格娜·哈力木拉提,木合塔尔·吐尔洪,于 坤,等. 喀什葛尔河流域盐渍化土壤盐分特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(1):169-173.

[6]

古丽娜尔·托合提,海米提·依米提,米日姑·买买提,等. 伊犁河谷土壤含盐量空间变异和格局分析[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(2):154-158.

[7]

夏 军,王绍明,朱宏伟,等. 玛纳斯河流域中下游土壤盐分空间变异性研究[J]. 新疆农业科学,2012,49(3):542-548.

[8]

阿布都热合曼·哈力克. 新疆岳普湖县土壤盐分空间变异及其分布特征研究[J]. 水土保持研究,2012,18(1):97-100.

[9]

祖皮艳木·买买提,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜. 伊犁河谷地下水及土壤盐分分布特征[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):58-63.

[10]

赵 枫,金海龙. 新疆阿其克苏河沿岸土壤盐分与离子含量关系研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(6):109-112.

[11]

徐欢欢,曾从盛,王维奇,等. 艾比湖湿地土壤有机碳垂直分布特征及其影响因子分析[J]. 福建师范大学学报,2010,26(5):86-91.

[12]

毛任钊,田魁祥,松本聪,等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. 土壤,1997,29(6):326-331.

[13]

王玉刚,肖笃宁,李 彦. 流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性[J]. 生态学报,2007,27(12):5262-5270.

[14]

周在明,张光辉,王金哲,等. 环渤海微咸水区土壤盐分及盐渍化程度的空间格局[J]. 农业工程学报,2010,26(10):15-20.

[15]

李朝生,杨晓晖,于春堂,等. 库布齐沙漠自然植被与人工植被土壤水盐空间异质性比较研究[J]. 生态环境学报,2010,19(18):2072-2078.