

焉耆盆地土壤盐分剖面特征 及其与土壤颗粒组成的关系

杜金龙, 靳孟贵, 欧阳正平, 刘延锋

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为查明焉耆盆地土壤盐分剖面特征及其影响因素, 进行土壤样本含盐量及颗粒组成测试, 利用 Spearman 等级相关分析两者关系. 结果表明: 土壤盐分剖面分为 3 种类型——均布型、表聚型和振荡型, 均布型剖面含盐量最低且分布均匀, 表聚型剖面盐分表聚特征最明显(表聚系数 4.20), 振荡型剖面含盐量高且变异程度大(变异系数 82.4%); 土样类型中粉质壤土最多(占 70.8%), 颗粒组成中粉粒平均含量最高(57.1%); 均布型剖面盐分与粘粒含量相关程度最高(相关系数 0.560), 为极显著正相关; 振荡型剖面盐分与砂粒含量相关程度最高(相关系数 -0.639), 呈极显著负相关; 表聚型剖面盐分与颗粒组成无明显关系. 结合各类剖面分布区域可知, 在砂粒含量与盐分含量较低的非盐渍化地带, 土壤盐分分布主要受粘粒含量影响; 砂粒含量与盐分含量较高的盐渍化地带, 土壤盐分分布主要受砂粒含量影响.

关键词: 土壤盐分剖面; 颗粒组成; Spearman 等级相关; 焉耆盆地.

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2008)01-0131-06

收稿日期: 2007-06-25

Characteristics of Soil Salinity Profiles and Relationship between Salinity and Soil Particle Composition in Yanqi Basin of Xinjiang, China

DU Jin-long, JIN Meng-gui, OUYANG Zheng-ping, LIU Yan-feng

Faculty of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: To understand the distribution pattern of salinity in soil profiles and factors influenced, soil samples were collected from irrigated areas of Yanqi basin and tested for total salinity and soil particle composition, and then the relationship between salinity and particle composition was studied using the Spearman rank correlation analysis. Based on the analysis, soil salinity profiles in the area are classified into three types: equably distribution profiles (EDP), surface accumulation profiles (SAP) and oscillation profiles (OP). EDP are featured with the lowest and equal distribution of salinity; SAP are characterized by the most obvious soil surface salinity accumulation (accumulation coefficient is 4.20), OP by the highest salinity and the largest coefficient of variation (82.4%). Silty loam is the most common textural class (70.8% in all soil samples) and silt is the highest particle-size fraction of soil samples (mean content is 57.1%). In EDP the correlation coefficient of salinity with clay content (0.560) is the highest, and the positive correlation of them is extremely significant. In OP the correlation coefficient of salinity with sand content (-0.639) is the highest, and the negative correlation of them is extremely significant. In SAP the salinity is not obviously correlated with soil particle composition. Considering the existing areas of EDP and OP, it is found that soil salinity is mainly affected by the clay content in the non-salinization area with relatively lower salinity and sand content, and whereas it is mainly affected by the sand content in the salinization area with relatively higher salinity and sand content.

Key word: soil salinity profile; soil particle composition; Spearman rank correlation; Yanqi basin.

土壤垂向剖面中不同土质及其组合方式对土壤水分、养分、盐分以及热量的运移有着重要的制约作用,对土壤次生盐渍化发展和生产性能均有明显影响(赵风岩,1997; Yang and Ernest, 2002; 史文娟等, 2005). 尤其在土壤层次变化明显的冲积平原,土壤质地是影响盐渍化土壤水盐运动的重要因素(温以华, 2002; 李韵珠和胡克林, 2004). Jacobsen *et al.* (1992)、Porro *et al.* (1993)进行了层状土壤中水分和溶质运移研究,刘思义和魏由庆(1988)、刘福汉和王遵亲(1993)则探讨了蒸发条件下土壤质地对土壤水盐运移的影响.

研究区长期不合理的灌溉方式及特殊的气候条件,造成了土壤盐渍化的形成与蔓延. 目前盆地内 64% 以上地区处于盐渍化状态,其中约 62% 的灌区地下水位埋深小于 2 m,大量耕地因次生盐渍化而荒废(陈模和杨绍斌, 1992; 靳孟贵等, 2002). 刘延锋等(2004a, 2004b)分析研究区土壤盐分组成、盐渍化类型以及盐渍化程度,利用趋势面法与主成分分析法研究了土壤盐分的空间分布特征;李海涛等(2006a, 2006b)利用电磁感应方法与 ASTER 影像解译方法进行了研究区土壤盐渍化程度分析评价. 上述研究着重考虑土壤盐分尤其是表盐的平面分布特征. 本文对焉耆盆地盐分在土壤剖面上的分布特征进行较为深入的研究,划分出不同的盐分剖面类型,定量分析了土壤盐分与颗粒组成的关系,对于探讨研究区土壤含盐量分布规律及成因,建立水盐运移模型,制订土壤盐碱化防治措施具有一定的理论与实际意义.

1 研究区概况

焉耆盆地位于新疆巴音郭楞蒙古自治州内,东经 $86^{\circ}15' \sim 87^{\circ}00'$,北纬 $41^{\circ}45' \sim 42^{\circ}15'$,面积 $13\,612\text{ km}^2$. 北依天山、南接塔克拉玛干大沙漠,为一半封闭山间盆地,分为绿洲区、博斯腾湖和湖滨湿地,地势自西北向东南倾斜,地面高程 $1\,200 \sim 1\,031\text{ m}$. 主要地貌类型为背斜丘陵、冲洪积平原、湖积平原与湖滨湿地,岩性组成以砂砾石、中粗砂、中细砂、粉质壤土为主. 深居欧亚大陆腹地,为明显的大陆性干旱半干旱气候,年均气温 $8.0^{\circ}\text{C} \sim 8.9^{\circ}\text{C}$,年降雨量 $50 \sim 80\text{ mm}$,年蒸发量 $2\,000 \sim 2\,450\text{ mm}$,蒸降比在 $30 \sim 40$ 以上. 境内主要河流为开都河、黄水河、清水河等,开都河是绿洲区最主要的河流与水源,年均径流

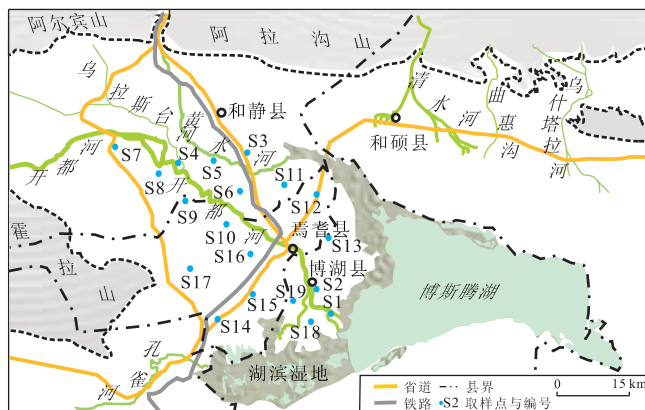


图 1 焉耆盆地地理位置图及土壤取样点空间分布
Fig. 1 Geography map of Yanqi basin and location of soil sampling

量为 $33.4 \times 10^8\text{ m}^3$. 研究区地理位置如图 1 所示.

2 材料与方法

2006 年 7~8 月沿研究区开都河两岸农灌区,以 GPS 定点,布设土壤采样点 19 处(图 1 中 S1~S19). 利用德国制硬土取样器采集土样,间距 0.2 m ,潜水位处终孔(水位埋深 $2 \sim 3\text{ m}$),受客观条件所限,最大采样深度为 2.4 m ,采集土壤样本 185 个.

将封装取回的土样自然风干,分别进行土壤盐分(易溶盐含量)测试与土壤颗粒分析. 土壤盐分测定取自然风干土样过 0.21 mm 孔径(70 目)标准筛,取过筛后土样 40 g 与 200 ml 去离子水以 $1:5$ 比例混溶,中速振荡过滤后得到土壤浸提液,利用美国 HACH 分析仪(型号为 SensionTM 156)测定浸提液 TDS 含量,换算成土壤易溶盐含量. 土壤颗粒分析利用甲种密度计法测定(中华人民共和国水利部, 1999),粒级分类(砂粒, $2 \sim 0.05\text{ mm}$; 粉粒, $0.05 \sim 0.002\text{ mm}$; 粘粒, $<0.002\text{ mm}$)及土壤定名参照美国农业部土壤保持局(USDA-SCS, 1975)制定的土壤分类标准.

3 结果与分析

3.1 土壤盐分剖面分布

土壤盐分空间分布规律为,盆地边缘戈壁砾石带潜水位埋深大,土壤含盐量小,自山前向湖滨区,潜水位埋深逐渐变浅,土壤盐分因蒸发而增加,至湖滨最大,农灌区因排水土壤盐分相对较低.

表 1 焉耆盆地不同类型盐分剖面土样点分布状况

Table 1 Spatial distribution of soil sampling holes for different kinds of profiles in Yanqi basin

盐分剖面类型	土样点编号	比例(%)	分布范围
I	S7,S8,S9,S10,S12,S13,S17,S19	47.0	开都河南岸及北岸局部,属非盐渍化区
II	S1,S16	11.8	博斯腾湖滨及开都河南岸局部,属盐渍化区
III	S2,S3,S5,S6,S11,S15,S18	41.2	开都河北岸及南岸局部,属盐渍化区

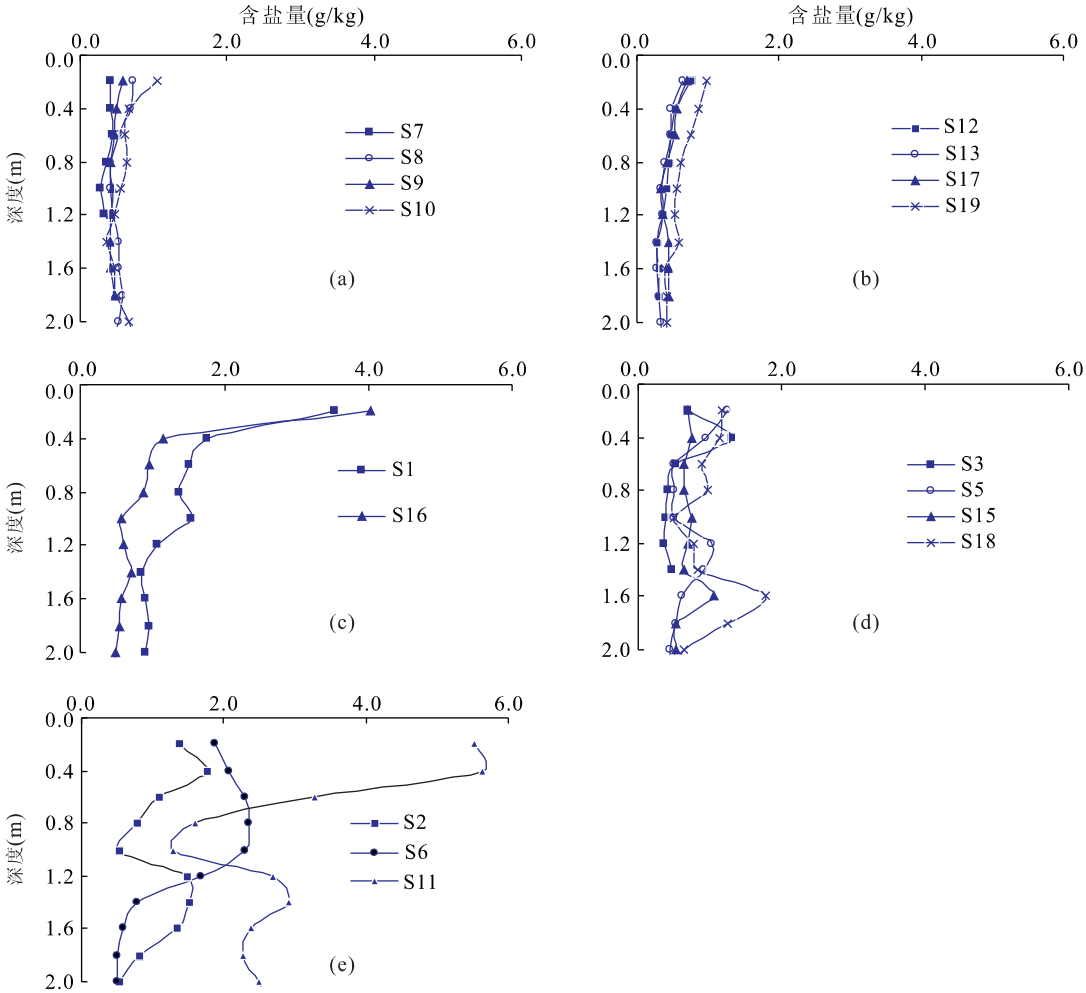


图 2 焉耆盆地不同类型盐分剖面

Fig. 2 Classification of salinity profiles in Yanqi basin

a. 均布型盐分剖面; b. 均布型盐分剖面; c. 表聚型盐分剖面; d. 振荡型盐分剖面; e. 振荡型盐分剖面

土壤剖面上土壤含盐量随深度变浅有逐渐增加趋势,呈现盐分的表集特征。同时,不同空间位置的土壤剖面,盐分剖面分布特征不同。本文基于 17 个土壤取样点(S4、S14 因数据太少舍弃)的盐分剖面,分析剖面上土壤盐分分布特征,包括盐分含量大小、变异程度及表聚程度等,并利用数理统计方法探寻土壤盐分分布规律,将土壤盐分剖面分为如下 3 种类型(表 1):

I 类剖面:均布型(或缓变型)土壤盐分剖面(图

2a,2b),该类剖面盐分含量随深度增加无明显变化,表层盐分无明显增加。对 I 类剖面土样养分进行统计分析可知(表 2),盐分平均值(0.50 g/kg)及变异系数(34.0%)在 3 类剖面中均为最小,表明该类剖面盐分含量低且分布均匀;盐分表聚系数为 1.55,低于 II 类剖面,和 III 类持平,表明该类剖面的盐分表聚特征不明显。I 类剖面在研究区较为常见,土壤取样点数占总数的 47.0%,主要分布于开都河南岸及北岸局部非盐渍化地段。

表 2 焉耆盆地不同类型盐分剖面土壤样本盐分统计值

Table 2 Statistical characteristics of soil samples for different kinds of profiles in Yanqi basin

土壤盐分 剖面类型	最大值	最小值	极差	平均值	标准差	变异系数	表层含量 0~20 cm	下层含量 20~200 cm	表聚系数
I	1.15	0.26	0.89	0.50	0.17	34.0%	0.73	0.47	1.55
II	4.02	0.44	3.58	1.16	0.93	80.2%	3.78	0.90	4.20
III	5.64	0.37	5.27	1.25	1.03	82.4%	1.80	1.19	1.51
I, II, III	5.64	0.26	5.38	0.89	0.82	92.1%	1.53	0.83	1.84

注:土壤盐分含量的单位为 g/kg.

II类剖面:表聚型土壤盐分剖面(图 2c),该类剖面下层盐分分布特征与 I 类剖面类似,但剖面表层土壤(0.0~0.4 m 深度)盐分含量急剧增加,从 1.0 g/kg 左右突变至 4.0 g/kg 以上.从表 2 中可以看出,II类剖面土壤盐分平均值(1.16 g/kg)与变异系数(80.2%),明显高于 I 类剖面,表明该类剖面的土壤盐分含量高且分布不均匀;表聚系数达 4.20,明显高于其他两类,表明该类剖面具有强烈的盐分表聚特征. II类剖面在研究区较少,土壤取样点数仅占总数 11.8%,散布于博斯腾湖滨及开都河南岸的盐渍化地段.

III类剖面:振荡型土壤盐分剖面(图 2d,2e),土壤盐分剖面出现峰谷交替状况,盐分除了因表聚效应在土壤表层附近出现波峰,土壤下部一定深度也出现波状起伏,部分土样点表现尤为明显(图 2e),取样点 S11 盐分含量在 1.0 m 深度出现谷值 1.3 g/kg,与 0.4 m 深度的峰值相差达 4.34 g/kg.由表 2 可知,该类剖面盐分平均值和变异系数均最大,表聚系数与 I 类剖面持平,表明该类剖面盐分含量高、分布不均匀,盐分表聚特征不明显. III类剖面土壤取样点数占总数的 41.0%,主要分布于开都河北岸及南岸局部盐渍化区.

3.2 土壤颗粒组成空间分布

从表 3 中可以看出,研究区浅层(2.4 m 深度以上)土壤类型以细粒的壤土为主,土壤样本数超过总数的 90%,其中粉质壤土所占比例最大,达 70.8%,粉土、砂土及壤质砂土等土壤类型所占比例很少,多以较薄夹层的形式在土壤中出现.从表 4 可知,土壤颗粒组成以细粒组分(粉粒,粘粒)为主,平均含量接近 70%.以粉粒组分的平均含量最高,达 57.1%,砂粒次之,粘粒最少.从变异程度看,砂粒组分的变异系数最大,粘粒与粉粒基本持平,说明砂粒空间变异性相对较大,而粉粒与粘粒的空间分布则比较均匀.对比不同的土壤剖面类型(表5),可知II类剖面粉粒、粘

表 3 焉耆盆地土壤类型分布

Table 3 Distribution of soil textural classes in Yanqi basin

土壤类型	粉质壤土	砂质壤土	壤土	粉土	砂土	壤质砂土
土样数	138	22	16	9	6	4
	70.8	11.3	8.2	4.6	3.1	2.0

注:粉质壤土、砂质壤土和壤土所占比例为 90.3%.

表 4 焉耆盆地土样颗粒组成百分含量统计特征值

Table 4 Statistical characteristics of sand, silt and clay fractions in Yanqi basin

项目	最大值	最小值	极差	平均值	标准差	变异系数
砂粒	91.6	0.0	91.6	30.0	23.2	77.3
粉粒	87.5	5.9	81.6	57.1	20.2	35.4
粘粒	25.5	0.0	25.5	12.9	4.9	38.0

表 5 各类盐分剖面土样颗粒组成百分含量平均值

Table 5 Average content of sand, silt and clay in soil samples for different kinds of profiles

类型	砂粒	粉粒	粘粒
I	29.0	58.2	12.8
II	15.3	70.0	14.7
III	36.8	51.4	11.8
I,II,III	30.0	57.1	12.9

粒平均含量最大,而III类剖面砂粒平均含量最大.

3.3 土壤盐分与土壤颗粒组成相关分析

影响土壤盐分分布的自然因素,主要包括气候、地下水、土壤颗粒组成、土壤含水量及地形地貌等.研究区气候干旱,地下水与土壤水蒸散发是盐分在土壤中运移和盐分表聚的直接原因;土壤颗粒组成、土壤含水量及地形地貌,则是影响盐分在土壤剖面分布的重要因素.表 6 是各类盐分剖面土壤含盐量与各粒度组分之间的相关性分析结果,为了避免土壤盐分表聚特征的干扰,剔除表层 0~20 cm 土样的盐分数据,并在表中对土样剔除前后相关系数的变化进行了比较.

表 6 各类盐分剖面土壤含盐量与土壤粒度组分含量间关系(Spearman 系数)

Table 6 Relationship between soil salinity and content of sand, silt and clay for different kinds of profiles

	砂粒(2~0.05 mm)		粉粒(0.05~0.002 mm)		粘粒(<0.002 mm)		土壤盐分剖面类型
	别样前	别样后	别样前	别样后	别样前	别样后	
土壤含盐量	-0.181	-0.253*	0.081	0.158	0.544**	0.560**	I
	-0.009	-0.121	0.125	0.207	-0.093	-0.061	II
	-0.615**	-0.639**	0.590**	0.613**	0.394**	0.398**	III

* Sig. <0.05(2-tailed); ** Sig. <0.01(2-tailed).

从表 6 中可以看出,除 II 类剖面外, I、III 类剖面的土壤含盐量与土壤粒度组分的含量之间,呈现较为显著的相关关系. 观察别样前后相关系数变化,可以发现别样后各参数间的相关系数有了不同程度增加,相关关系更加显著,说明别样能够较好的克服盐分表聚特征对土壤盐分分布的影响. 因此,笔者利用别样后土壤含盐量与各粒度组分含量间的相关系数,定量分析土壤颗粒组成对土壤盐分分布的影响.

对 I、III 类盐分剖面各参数间进行 Spearman 等级相关分析可知,土壤含盐量与砂粒含量存在负相关,而与粉粒、粘粒含量呈正相关,但相关系数的大小及其显著性存在明显差异.

I 类剖面土壤含盐量与粘粒含量相关系数为 0.560,相关程度明显高于砂粒、粉粒. 经双尾 T 检验可知,相关系数在 0.01 水平上显著,相关具有统计学意义,可认为土壤含盐量与粘粒含量呈极显著正相关;土壤含盐量与砂粒含量的相关系数相对较小(-0.253),在 0.05 水平上显著,相关仍具有统计学意义,可认为土壤含盐量与砂粒含量呈显著负相关;土壤含盐量与粉粒含量相关系数最小,无明显统计学意义. 表明 I 类剖面土壤盐分分布受粘粒与砂粒含量影响,且前者为主要影响因素.

III 类剖面土壤含盐量与砂粒含量呈极显著负相关,与粉粒、粘粒含量呈极显著正相关,且与砂粒含量相关程度最高(相关系数为-0.639). 表明 III 类剖面土壤各粒度组分对盐分分布存在不同程度的影响,其中砂粒组分的影响最大.

结合各类盐分剖面的分布区域(表 1),土壤含盐量大小(表 2)及土壤颗粒平均组成(表 5),可知在土壤粒度较细、盐分含量较低的非盐渍化地带(即 I 类剖面分布区域),土壤盐分分布主要受土壤粘粒组分的影响与控制;而在粒度较粗、砂粒含量较高、盐分含量也较高的盐渍化地带(即 III 类剖面分布区域),土壤盐分分布主要受砂粒组分的影响与控制. 而 II 类剖面土壤盐分分布与土壤颗粒组成无明显相

关系.

4 结论

(1)焉耆盆地土壤剖面按不同的盐分分布特征可分为 3 种类型——均布型盐分剖面(I 类剖面)、表聚型盐分剖面(II 类剖面)和振荡型盐分剖面(III 类剖面),其中 I 类剖面土壤含盐量小且分布均匀, II 类剖面土壤含盐量较大,表聚特征最明显,而振荡型剖面盐分含量高且变异程度最大.

(2) I 类剖面主要分布于开都河南岸及北岸局部的非盐渍化地段, II 类剖面散布于博斯腾湖滨及开都河南岸的盐渍化地段, III 类剖面主要分布于开都河北岸及南岸局部的盐渍化区, I、III 类剖面分布范围接近,两者所属的土壤取样点数之和接近总数的 90%.

(3)土壤类型以细粒壤土为主,粉质壤土所占比例最大,为 70.8%;土壤颗粒组成中以粒度较细的粉粒、粘粒为主,在研究区分布均匀,粉粒的平均含量最高,为 57.1%. 在 3 类盐分剖面中, II 类剖面粉粒、粘粒及 III 类剖面砂粒的平均含量最大.

(4)土壤粒度较细、砂粒含量较低、盐分含量较低的非盐渍化地带(I 类剖面分布区域),土壤盐分分布主要受土壤粘粒组分的影响与控制,土壤含盐量与粘粒含量的 Spearman 相关系数为 0.560,呈极显著正相关;而在粒度较粗、砂粒含量较高、盐分含量也较高的盐渍化地带(III 类剖面分布区域),土壤盐分分布主要受砂粒组分的影响与控制,土壤含盐量与砂粒含量的 Spearman 相关系数为-0.639,呈极显著负相关; II 类剖面土壤盐分分布与土壤颗粒组成之间无明显关系.

References

Chen, M., Yang, S. B., 1992. Formation and improvement of salt-affected soil in Yanqi basin, Xinjiang, China. *Terri-*

- tory & Natural Resources Study, (3): 46—49 (in Chinese with English abstract).
- Jacobsen, O. H., Leij, F. J., Van Genuchten, M. Th., 1992. Ly-simeter study of an ion transport through layered coarse-textured soil profiles. *Soil Sci.*, 154(3): 196—205.
- Jin, M. G., Liu, Y. F., Dong, X. G., et al., 2002. Water saving irrigation and control of agricultural pollution: A case study in Yanqi basin, Xinjiang, China. *Geological Science and Technology Information*, 21(1): 51—54 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. T., Brunner, P., Li, W. P., et al., 2006a. Application of ASTER image to soil salinization assessment. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 33(5): 75—79 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. T., Li, X. M., Philip, B., et al., 2006b. Application of electromagnetic method to soil salinization assessment. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 33(1): 95—98 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. Z., Hu, K. L., 2004. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation. *Acta Pedologica Sinica*, 28(3): 105—106 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. H., Wang, Z. Q., 1993. Salt-water dynamics in soil profiles of different texture under groundwater evaporation condition. *Acta Pedologica Sinica*, 30(2): 173—181 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. Y., Wei, Y. Q., 1988. Study on the factors affecting salinization of soils in the Majia river valley. *Acta Pedologica Sinica*, 25(2): 110—118 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. F., Jin, M. G., Jin, Y. C., 2004a. Principal component analysis of soil salinization in Yanqi basin. *Agricultural Research in the Arid Area*, 24(1): 165—171 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. F., Jin, M. G., Jin, Y. C., et al., 2004b. Characteristics analysis of soil salinization in Yanqi basin of Xinjiang Wei Autonomous region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 24(1): 49—52 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Water Ressources of P. R. C., 1999. Standard of geotechnical test methods (GB/T50123—1999). China Planning Press, Beijing, 315 (in Chinese).
- Porro, I., Wierenga, P. J., Hills, R. G., 1993. Solute transport through large uniform and layered soil columns. *Water Resour. Res.*, 29(4): 1321—1330.
- Shi, W. J., Shen, B., Wang, Z. R., 2005. Reviews on transport of water and salt in layered soil. *Agricultural Research in the Arid Area*, 23(5): 250—254 (in Chinese with English abstract).
- USDA-SCS, 1975. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. U. S. Gov. Print. Office, Washington, D. C., 436.
- Wen, Y. H., 2002. Influence of texture and bulk density on the transport law of Cl^- in soils. *Research of Soil and Water Conservation*, 9(1): 73—75 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. D., Ernest, K. Y., 2002. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions. *Advances in Environmental Research*, 6: 505—521.
- Zhao, F. Y., 1997. Permutation and combination of soil layers and differences in crop production. *Chinese Journal of Soil Science*, 28(3): 105—106 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈模, 杨绍斌, 1992. 焉耆盆地盐渍化土壤的形成与改良. 国土与自然资源研究, (3): 46—49.
- 靳孟贵, 刘延锋, 董新光, 等, 2002. 节水灌溉与农业面源污染控制研究—以新疆焉耆盆地为例. 地质科技情报, 21(1): 51—54.
- 李海涛, Brunner, P., 李文鹏, 等, 2006a. ASTER 遥感影像数据在土壤盐渍化评价中的应用. 水文地质工程地质, 33(5): 75—79.
- 李海涛, 李小梅, Philip, B., 等, 2006b. 电磁感应方法在土壤盐渍化评价中的应用研究. 水文地质工程地质, 33(1): 95—98.
- 李韵珠, 胡克林, 2004. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. 土壤学报, 41(4): 493—502.
- 刘福汉, 王遵亲, 1993. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水运动. 土壤学报, 30(2): 173—181.
- 刘思义, 魏由庆, 1988. 马颊河流域影响土壤盐渍化的几个因素的研究. 土壤学报, 25(2): 110—118.
- 刘延锋, 靳孟贵, 金英春, 2004a. 焉耆盆地土壤盐渍化状况的主成分分析. 干旱地区农业研究, 24(1): 165—171.
- 刘延锋, 靳孟贵, 金英春, 等, 2004b. 新疆焉耆盆地土壤盐渍化特征分析. 水土保持通报, 24(1): 49—52.
- 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 2005. 层状土壤水盐动态研究与分析. 干旱地区农业研究, 23(5): 250—254.
- 温以华, 2002. 不同质地和容重对 Cl^- 在土壤中运移规律的影响. 水土保持研究, 9(1): 73—75.
- 赵凤岩, 1997. 土层排列组合与作物产量差异. 土壤通报, 28(3): 105—106.
- 中华人民共和国水利部, 1999. 土工试验方法标准 (GB/T50123—1999). 北京: 中国计划出版社, 315.