

黄河湿地小白河片区微地形土壤盐基离子分布特征

李雅琴

内蒙古师范大学, 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年3月31日; 录用日期: 2022年4月22日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

为探究微地形特征下不同盐基离子对不同深度土壤盐分空间分布规律, 本研究以黄河小白河段滨河地区为研究区, 分析不同土壤深度各盐基离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})及全盐量空间变异特征, 结果表明: 1) 土壤中离子总含量浓度大小关系排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。研究地土壤中盐碱类物质主要是氯化钙和硫酸钙, 小白河流域特有的土壤盐分组成结构特征为氯化物-硫酸性土壤。2) 对比不同部位离子含量可知, Na^+ 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 各离子含量均表现出样地2 > 样地3 > 样地1, Na^+ 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 主要聚集于盆地坡面中央; 对比 Cl^- 和 NO_3^- 浓度可知其浓度呈现样地1 > 样地2 > 样地3, Cl^- 和 NO_3^- 主要聚集于海拔较低的盆地中央。3) 不同深度的土壤层离子浓度, 除表面离子总含量极少之外, 各层盐基离子含量均高于1500 mg/L, 整体呈现出中间土层含量较高, 20~30 cm之间离子总浓度值最高, 两侧数值对称的势态。在土壤中各种阴阳离子主要以二价不易迁移的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 居多。

关键词

土壤, 盐分, 空间分布, 微地形, 滨河地区

Distribution Characteristics of Soil Base Ions in Micro Topography in Xiao Bai River Area of the Yellow River Wetland

Yaqin Li

School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Mar. 31st, 2022; accepted: Apr. 22nd, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

In order to explore the spatial distribution law of different base ions on soil salt at different depths under micro topographic characteristics, this study takes the riverside area of Xiao Bai reach of the Yellow River as the research area, and analyzes the spatial variation characteristics of base ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-}) and total salt at different soil depths. The results show that: 1) The order of the total ion concentration of soil species is $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. The saline alkali substances in the soil of the study area are mainly calcium chloride and calcium sulfate. The unique soil salt composition and structure of Xiao Bai River basin is chloride sulfate soil. 2) Comparing the ion contents in different parts, it can be seen that the ion contents of Na^+ , F^- , SO_4^{2-} and Ca^{2+} show that sample 2 > sample 3 > sample 1, and Na^+ , F^- , SO_4^{2-} and Ca^{2+} are mainly concentrated in the center of the slope of the basin; Comparing the concentrations of Cl^- and NO_3^- it is shown that the concentrations of Cl^- and NO_3^- are sample 1 > sample 2 > sample 3. Cl^- and NO_3^- are mainly concentrated in the center of the basin with low altitude. 3) Comparing the ion concentration of soil layers at different depths, except that the total content of surface ions is very small, the content of base ions in each layer is higher than 1500 mg/L, which shows that the content of middle soil layer is high, the total ion concentration value between 20~30 cm is the highest, and the values on both sides are symmetrical. In the soil, the divalent Ca^{2+} and SO_4^{2-} which are not easy to migrate are the main cations.

Keywords

Soil, Salinity, Spatial Distribution, Micro Topography, Riverside Area

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变暖问题日益加重[1], 土壤盐渍化逐渐成为各国学者关心的热点问题之一[2] [3] [4]。土壤盐渍化是由于自然环境的变化或人类不合理利用而引起的一种主要的环境问题。至今全球约有 8.31 亿 hm^2 的土壤受到盐渍化的影响, 其问题对人类生产生活的影响是不可忽视的[5]。在我国, 盐渍化土壤分布广泛, 以沿海地区及北方为主, 其面积达 3600 万 hm^2 , 占全国可利用面积 5%。主要分布于辽、吉、黑、冀、鲁、豫、晋、新、陕、甘、宁、青、苏、浙、皖、闽、粤、内蒙古及西藏等 19 个省区[6] [7] [8]。盐渍化过程主要是由于土壤底层或地下水的盐分随毛管水上升到地表, 水分蒸发后使盐分积累在表层土壤中的过程[9]。其中黄河湿地地处半湿润 - 半干旱地区, 伴随着地下水位线的涨落以及地表土壤水分的蒸散, 其大部分土壤呈现不同程度的盐渍化, 伴随当地农业的重灌轻排, 当地盐渍化日益加重[10]。进一步影响了湿地生态系统的稳定性, 众多野生动物和稀有植物的生存受到影响。盐渍化问题已经成为当前湿地生态系统可持续发展面临的重大问题之一[11]。

盐渍化土壤中的水分和盐基离子的运移是其研究和核心问题[12] [13] [14]。自然条件下的土壤胶体具有吸附交换溶液中离子的能力, 这一过程关系到土壤众多的化学特性, 可以反映其土壤质量[15] [16] [17]。

土壤离子交换量直接表征了土壤缓冲能力,是进行土壤评价的重要指标之一[18]。土壤盐基离子含量和饱和度在很大程度上反映了盐基类元素的运移、循环情况[19]。此外,交换性盐基离子在对土壤发生盐碱化过程的研究中也具有重要的参考作用[20] [21] [22]。

黄河作为北方地区重要的河流之一,小白河段位于干旱-半干旱的地区,土壤水分蒸发量大。目前,土壤盐渍化问题日益加重。目前对黄河湿地小白河段土壤离子交换量和盐基离子空间分布研究较少,本研究通过野外调查和采集土壤样品。分析了黄河湿地小白河段微地形下各土壤层的盐基离子含量的空间分布情况,为黄河湿地小白河段的生态修复及土地合理利用提供理论基础。

2. 区域概括

黄河小白河段东起画匠营,西至昆都仑河,是包头湿地重点保护区。位于半干旱中温带大陆性季风气候区域,全年最高气温 35.5℃,均气温 8.5℃。年平均降水为 300~400 mm,冬季降水较少,占全年降水量的 5.6%。海拔高度为 900 m~1000 m 之间,地带性土壤类型为栗钙土。植被多见蒺藜 [*Tribulus terrestris* L.]、赖草 [*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.]、狗尾草 [*Setaria viridis* (L.) Beauv.] 等。

研究区地处内陆中高纬度地区,日照多、全年降水主要集中在夏秋,季冬春季节降水较少,降雨少且蒸发量大,年降水在 300 mm~350 mm 之间,而蒸发量则在 1300 mm 以上,植被种类较少。地貌为河漫滩,地表零星分布有洼地,地表裸露处可见盐分析出的盐滩、盐斑迹象,盐碱总面积较大,分布范围较广。研究采样点为湿地北岸,地处北高南低的天然微盆地(相对位置见图 1 和表 1)。

Table 1. Location of each sampling point

表 1. 各取样点位置

名称	取样地一	取样地二	取样地三
纬度	40.534568°N	40.535186°N	40.537058°N
经度	109.87981°E	109.879818°E	109.879759°E
高度	H: 976.00 m	H: 976.93 m	H: 979.00 m

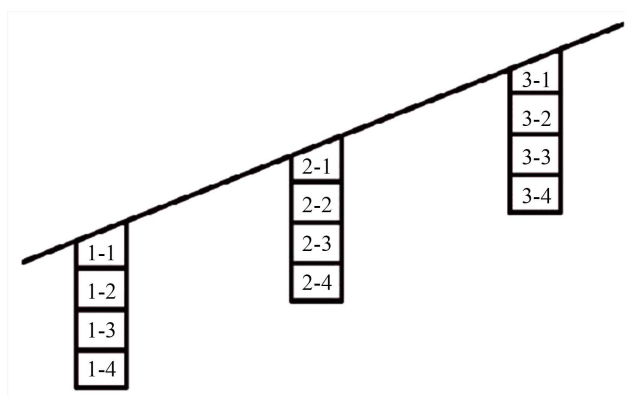


Figure 1. Relative positions of sampling points

图 1. 各样点相对位置

3. 样品采集与分析

3.1. 采样点的选取

研究区以濒临小白河水域为背景,结合微地形地貌等土壤资料确定研究区有代表性的盐碱土壤小区

域划定采集土壤的基点。为揭示不同位置中土壤中盐基离子含量变化情况,在不同高度和不同海拔位置进行土样采集,土壤样本采集分布在河岸阶地,且为分布于天然微型盆地[Natural micro basin]坡面、盆地中央和盆地边缘三个部位,盆地底部与盆地顶部高差大致为 3 m。

3.2. 野外样品采集

于 2018 年 11 月在研究区采集土壤样品,共选取 3 个点(命名见表 2,相对位置见表 1),分别进行 GPS 定位,每个采样点周围涉及约 10 cm,并按照不同深度分四层(0 cm~10 cm、10 cm~20 cm、20 cm~30 cm、30 cm~50 cm)取样,每个点土壤采集垂直方向上共分为四层,作为垂直方向研究分组,每层取约 600 g 样土,用塑料袋密封带回所取品带回实验室通风处自然风干。风干后经手工研磨后并过孔径大小为 0.20 mm 土筛,制作土壤溶液,备用于土壤中离子含量的测定。

Table 2. Depth and range of various soils from the surface

表 2. 各样土距离地表深度及范围

编号	编号	编号	深度及范围(cm)
1-1	2-1	3-1	0~10
1-2	2-2	3-2	10~20
1-3	2-3	3-3	20~30
1-4	2-4	3-4	30~50

3.3. 数据提取

本实验采取离子色谱仪,相较于量气法、电离法、离子交换法、中和滴定法、原子吸收光度分析分析法更加高效准确,操作简单。针对研究区土壤含盐量及常规主要离子所配溶液采取 1 g 土样与 10 ml 国家一级标准超纯水(水土比 10:1)混合,经震荡仪 200 r/min、30 min 震荡和磁极牌 800 型离心沉淀器[Sedimentation centrifuge] 4000 r/min 离心 5 min 之后,抽取上层清液。通过孔径 0.22 μm 进口膜过滤器过滤微粒固体后,利用 thermo-ics600 离子色谱仪进行土壤中阴阳离子种类含量的测定。该 ICS600 离子色谱仪进行测定数据,主要利用离子色谱分离柱(阳离子柱型号:CS12A,阴离子柱型号:AS22)。

3.4. 数据处理

根据野外调查资料和室内化学分析结果,采用导出数据后利用 Excel 软件对所测数据进行初步处理和筛选,采用控制变量法选择不同的分组进行对比分析其含量,得出土壤不同部位各盐基离子的空间分布状况。

4. 数据分析

4.1. 离子浓度对比分析

SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 F^- 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 Mg^{2+} 、 K^+ 各离子总含量如图所示,受微地形的影响同样地的土壤中离子含量存在一定的差异。土壤种离子总含量浓度大小关系排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。

由图 2 可知, Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 在阴阳离子中含量最高。 K^+ 由于含量过低几乎趋向于零,超出了仪器感知的范围故记作 0。 F^- 、 Na^+ 、 NO_3^- 、 Mg^{2+} 含量处于 0~50 mg/L 之间。其中离子数为 2 的 SO_4^{2-} 含量明显高于其他离子数均为 1 的阴离子,其含量几乎为一价离子的 20~25 倍。一价离子易于迁移,致使溶液中含

量较少，二价离子由于带电荷较多，难以交换不易迁移。

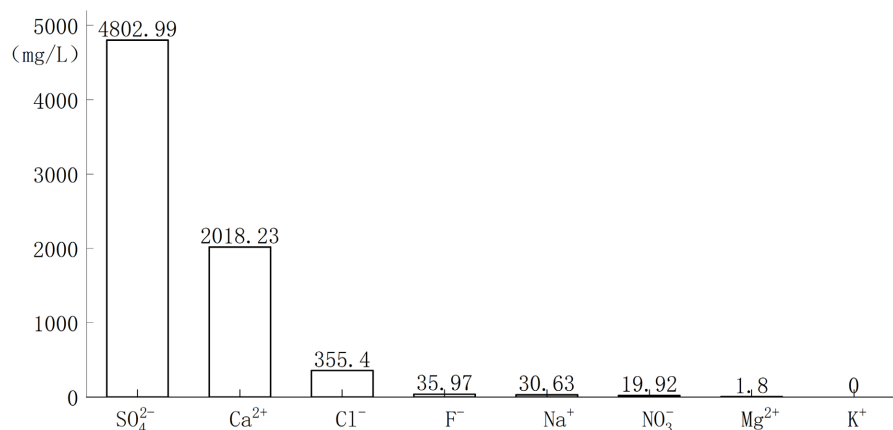


Figure 2. Total base ion content
图 2. 盐基离子总含量

主要以SO₄²⁻为主、Cl⁻次之，阳离子则主要以Ca²⁺居多。在八种盐基离子中SO₄²⁻、Ca²⁺、Cl⁻含量约占总量的98.78%。CaSO₄具有绝对优势，盐土中主要含有石膏(CaSO₄·2H₂O)，与此同时阴阳离子中Na⁺含量和Cl⁻含量也都较高，可见研究地土壤中盐碱类物质主要是氯化钙和硫酸钙，即该区土壤主要是氯化物-硫酸型土壤，反应了小白河流域特有的土壤盐分组成结构特征为氯化物-硫酸性土壤。

4.2. 离子空间分布分析

4.2.1. 不同地貌部位离子浓度分异分析

不同部位采集土样中阴阳离子含量浓度含量如表3所示。由于样地1、2、3与河面距离分别为较近、较远、最远三个点，基本可以将三个点的状况概括为一级阶段，第二级阶地，第三级阶地(接近本土土壤)。

Table 3. Statistics of total content of ions in soil samples at the same depth
表 3. 同一深度土样中各离子总含量统计

名称	样地 1	样地 2	样地 3
Na ⁺	0.35	20.48	9.85
F ⁻	4.68	19.27	12.01
SO ₄ ²⁻	289.38	420.79	305.71
Ca ²⁺	229.99	1052.88	735.36
Cl ⁻	234.41	80.87	40.13
NO ₃ ⁻	9.01	5.94	4.93
K ⁺	0.00	0.00	0.00
Mg ²⁺	0.21	0.00	1.61
离子总量	524.40	5300.53	1062.93

Na⁺、F⁻、SO₄²⁻和Ca²⁺各离子含量均表现出样地2 > 样地3 > 样地1，由离子含量总浓度大小可以发现，样地2 > 样地3 > 样地1。对比不同部位离子含量可知，盆地坡面离子含量远高于其他两个位置，其含量为盆地边缘的5倍，为盆地底部的10倍之多。对比Cl⁻和NO₃⁻浓度可知其浓度呈现样地1 > 样地

2 > 样地 3, 在样地 1 含量为样地 2 的 2~3 倍。样地 1 离子浓度含量为样地 3 的 2~5 倍, 可见 Cl^- 和 NO_3^- 主要聚集于海拔较低的盆地中央。

通过三个样点的离子浓度分析, 可以推测出离子浓度根据地下水高度不同的变化状况。在处于不同高度的三个样点中, 由于样点 1 距离河岸较近处, 海拔高度也相对较低, 地下水位较高, 相较其他位置离子更易被冲洗, 因此离子浓度大小呈现出样地 1 低于样地 2。 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均表现出在样地 2 含量最多, 样地 3 含量相对较少, 样地 1 含量最少。原因分析: 在微地形盆地坡底部、盆地坡中央、盆地坡顶部由于其相对位置, 地表径流由上而下, 淋溶作用下也从坡地高处向坡地低处流动。在没有地下水影响的情况下, 应呈现出离子浓度在盆地坡面底部最大, 顶部最小, 但是。由于采样点濒临河道, 在地下水不同程度的冲洗作用下, 离子含量在样地二出现最大值。

4.2.2. 不同部位离子浓度分异分析

如图 3 所示, 样点 1、2、3 分别位于微地形的盆地坡底部, 坡中央和坡顶部, 且在每个采样点垂直分为 4 个土层, 分析离子在空间上的分异。

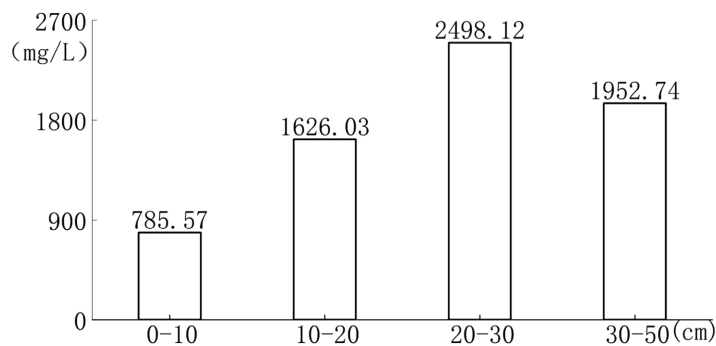


Figure 3. Total ion concentration of each soil
图 3. 各土壤离子浓度总含量

由图 3 可知, 在不同深度的土壤层中, 20~30 cm 之间离子总浓度值最高, 可见离子具有向 20 cm~30 cm 集中的特点; 在地表 0~10 cm 的土壤层种, 离子含量最低; 10~20 cm 土层与 30~50 cm 土层含量较接近。总体而言, 除了裸露的表面离子总含量极少之外, 各层盐基离子含量均高于 1500 mg/L, 呈现出中间土层含量较高, 两侧数值对称的势态。出现这种趋势的原因可能是植物根系处于距地表 20 cm 处。

Table 4. Cation content of various soils
表 4. 各样土阳离子含量

名称	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
1--1	37.27	0.08	0.00	0.00
1--2	119.72	0.00	0.00	0.35
1--3	51.77	0.12	0.00	0.00
1--4	21.23	0.00	0.00	0.00
2--1	85.96	0.00	0.00	1.30
2--2	407.24	0.00	0.00	5.12
2--3	273.75	0.00	0.00	10.98
2--4	285.93	0.00	0.00	3.08

Continued

3--1	221.07	1.54	0.00	1.34
3--2	446.90	0.00	0.00	2.71
3--3	15.20	0.00	0.00	2.83
3--4	52.20	0.08	0.00	2.97

土壤中阳离子含量(见表 4)对比可知, 该样土中常见的阳离子按其对胶体的凝聚力的的大小, 可排列如下顺序: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, Ca^{2+} 在各层含量均为最高, 其次 Na^+ 含量较高, Mg^{2+} 较低, K^+ 最低。 Ca^{2+} 、 Na^+ 出现土层数较多, Mg^{2+} 在盆地坡中央浓度为零, 盆地坡底部和顶部有少量分布, 且仅在表层及 20 cm 以下的土层中存在。 Ca^{2+} 、 Na^+ 均表现出向盆地坡中部集中趋势。

土壤盐基离子中阴离子不同离子在不同位置不同土层均有聚集, 且浓度不同。

Table 5. Anion content of various soils

表 5. 各样土阴离子含量

名称	NO_3^-	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}
1--1	2.28	1.51	27.08	35.48
1--2	2.00	0.98	55.00	116.39
1--3	3.35	1.21	93.04	74.14
1--4	1.38	0.99	59.29	63.37
2--1	1.67	2.19	5.18	282.01
2--2	1.41	3.79	19.90	802.96
2--3	1.66	7.15	43.51	1752.54
2--4	1.22	6.14	12.28	1370.40
3--1	1.15	2.13	5.32	71.14
3--2	1.98	2.93	10.57	28.20
3--3	1.11	2.60	11.18	152.22
3--4	0.72	4.35	13.07	54.16

对比表 4、表 5 可知, 在各层土壤中离子的含量排列顺序多数为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ 。 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 在 10~20 cm 中间土层(10~20、20~30 cm)均出现较大值, 可见阴离子在垂直上的分布规律为: 主要集中于第二、三土层。阴离子中 SO_4^{2-} 含量最高, 其次则为 Cl^- , 均在各样点中出现了二层, 三层含量高, 而第一、四层含量则相对较低的现象。 NO_3^- 、 Cl^- 在盆地坡底部聚集大于其他两个部位, SO_4^{2-} 、 F^- 在盆地坡面聚集较多, 且 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 分别在 2-3、1-3、1-3、2-3 出现最大值, 可见离子主要集中于盆地中低部位, 并且在 20~30 cm 土层上浓度最大。

总体而言, 该区土壤主要是氯化盐、硫酸盐, 其土壤类型为氯化物—硫酸型土壤, 反应了小白河流域特有的土壤盐分组成结构特征。

5. 结论

1) 土壤种离子总含量浓度大小关系排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。在八种盐基离子中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量约占总量的 98.78%。研究地土壤中盐碱类物质主要是氯化钙和硫酸钙, CaSO_4 具有绝对优势, 采样点土壤中主要含有石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 即该区土壤主要是氯化物—

硫酸型土壤，反应了小白河流域特有的土壤盐分组成结构特征为氯化物 - 硫酸性土壤。

2) 对比不同部位离子含量可知， Na^+ 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 各离子含量均表现出样地 2 > 样地 3 > 样地 1，盆地坡面中部离子含量远高于其他两个位置。对比 Cl^- 和 NO_3^- 浓度可知其浓度呈现样地 1 > 样地 2 > 样地 3， Cl^- 和 NO_3^- 主要聚集于海拔较低的盆地中央。

3) 对比不同深度的土壤层离子浓度，除表面离子总含量极少之外，各层盐基离子含量均高于 1500 mg/L，呈现出中间土层含量较高，20~30 cm 之间离子总浓度值最高，两侧数值对称的势态。土壤中阳离子含量对比为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 。 Ca^{2+} 、 Na^+ 出现土层数较多， Mg^{2+} 在盆地坡中央浓度为零，盆地坡底部和顶部有少量分布，且仅在表层及 20 cm 以下的土层中存在。 Ca^{2+} 、 Na^+ 均表现出向盆地坡中部集中趋势。在各层土壤中阴离子的含量排列顺序多数为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ 。 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 在 10~20 cm 中间土层(10~20、20~30 cm)均出现较大值，可见阴离子在垂直上的分布规律为：离子主要集中于盆地中低部位，且在 20~30 cm 土层上浓度最大。

参考文献

- [1] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 990-998.
- [2] Ghassemi, F., Jakeman, A.J. and Nix, H.A. (1995) Salinisation of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies. University of New South Wales Press Ltd, Sydney, 1-3.
- [3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [4] 翁永玲, 宫鹏. 土壤盐渍化遥感应用研究进展[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 369-375.
- [5] 李建国, 濮励杰, 朱明, 张润森. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [6] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181.
- [7] 丁建丽, 姚远, 王飞. 基于三维光谱特征空间的干旱区土壤盐渍化遥感定量研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 853-861.
- [8] 缙倩倩, 韩致文, 王国华. 中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(29): 246-250.
- [9] 马东豪. 土壤水盐运移特征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [10] 谭学界, 赵欣胜. 水深梯度下湿地植被空间分布与生态适应[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1460-1464.
- [11] 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1001-1019.
- [12] 姜林, 耿增超, 李珊珊, 余雕, 何绪生, 张强, 梁策, 刘贤德, 敬文茂, 王顺利. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3368-3377.
- [13] 胡宁, 娄翼来, 张晓珂, 梁文举, 梁雷. 保护性耕作对土壤交换性盐基组成的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1492-1496.
- [14] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2710-2715.
- [15] 胡俊栋, 沈亚婷, 王学军. 土壤胶体在不同饱和度土壤介质中的释放与淋溶行为研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1829-1836.
- [16] 孙建, 刘苗, 李立军, 刘景辉. 不同施肥处理对土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(4): 221-225.
- [17] 张素, 熊东红, 校亮, 杨丹, 张宝军, 吴汉. 干湿交替对土壤性质影响的研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 762-768. <https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2017.03.35>
- [18] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 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.
- [19] 张翠丽, 支金虎, 张桂兵, 姚永生, 卜东升. 塔里木河上游棉区不同类型盐土阳离子交换量分布特征及影响因素[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(6): 1057-1070.
- [20] 王瑞燕, 孔沈彬, 许璐, 李玉环, 程韦翰, 赵恩来. 黄河三角洲不同地表覆被类型和微地貌的土壤盐分空间分布

-
- [J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 132-141.
- [21] 阿斯古丽·木萨, 阿不都拉·阿不力孜, 瓦哈甫·哈力克, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 卢龙辉, 普拉提·莫合塔尔. 新疆克里雅绿洲土壤盐分、pH 和盐基离子空间异质性分析[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1007-1014.
- [22] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 崔佳琪, 王维刚. 河套灌区土壤水溶性盐基离子高光谱综合反演模型[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 344-355.