

克拉玛依人工碳汇林区景观地球化学特征与规律*

丁玉华^{1,2} 王让会^{1,2**} 宁虎森³

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院 南京 210044; 2. 中国气象局干旱气候变化与减灾
重点开放实验室 兰州 730020; 3. 新疆林业科学研究院 乌鲁木齐 830002)

摘 要 以克拉玛依人工碳汇林区的土壤可溶性盐分离子、地下水矿化度和植被为研究对象,综合运用描述性统计和相关性分析等方法,研究其景观地球化学特征,旨在通过对克拉玛依人工碳汇林区的景观地球化学特征的研究,为这一地区盐渍化土壤改良和沙漠化防治提供理论依据。结果表明:克拉玛依人工碳汇林区土壤 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 在 0~80 cm 范围内变异系数较大,80~100 cm 范围内,土壤总盐和各离子变异系数相对较小;盐分表聚现象严重;该地区盐土类型主要是硫酸盐型,其中 SO_4^{2-} 和 Na^+ 、 K^+ 为土壤可溶性盐的主要成分。研究区地下水呈弱碱性,除 HCO_3^- 外,其他离子和矿化度表现出较强的变异性;地下水的化学类型主要为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$,矿化度和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 相关系数较为显著。种植人工碳汇林后,除土壤 HCO_3^- 含量有轻微上升外,其他离子均有所下降,其中 SO_4^{2-} 含量的降低趋势最为明显。俄罗斯杨林分土壤含盐量随种植年限的增长明显降低,种植后的土壤盐渍化状况有明显改善。

关键词 景观地球化学 人工碳汇林 土壤 地下水 可溶性总盐 矿化度

中图分类号: P596 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)06-1348-06

Characteristics of landscape geochemistry in Karamay artificial carbon-sink forests

DING Yu-Hua^{1,2}, WANG Rang-Hui^{1,2}, NING Hu-Sen³

(1. School of Environmental Science and Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 3. Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi 830002, China)

Abstract Karamay artificial carbon-sink forest is located in the southern margin of Gurbantunggut Desert, where soil salinization is a severe ecological problem. With adequate knowledge on the patterns of soil soluble salts/ions distribution, mechanisms of change, chemical constituents of groundwater and varied characteristics of landscape patterns, saline soils can be rationally utilized and ecological agro-forestry efficiently developed. This paper aimed to lay the theoretical basis for ameliorating soil salinity and controlling desertification via analyzing the characteristics of Karamay landscape geochemistry. Using monitoring field data for soil soluble salt, groundwater salinity and vegetation cover in Karamay artificial carbon-sink forest, the characteristics of landscape geochemistry were analyzed via descriptive statistics and correlation analysis. The results showed great variation in contents of Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} in 0~80 cm soil, while less variation in salinity and salt ions contents in 80~100 cm soil layer was found. Soil salinity increased with increasing soil evaporation resulting in severe salt accumulation in surface soils of Karamay carbon-sink forest. Sulfate was the dominant salt in study area, which consisted mainly of soluble SO_4^{2-} and Na^+ and K^+ salts. With the exception of HCO_3^- , variations in groundwater salinity and the related compounds exhibited strong variation. Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ and K^+ were the main elements of groundwater mineralization, and significant linear correlations were noted among salinity and these ions. The groundwater chemical type was $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$. Forest protection ameliorated soil salinity. Although the dynamics of soil salinity varied from forest to forest, salinity (more for SO_4^{2-} salts) dropped after planting forests. Furthermore, soluble total salts significantly dropped with increasing age of the Russia poplar forest.

* 中国气象局干旱气象科学研究基金项目(IAM, 201001)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB705809)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09)资助

** 通讯作者: 王让会(1963~), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生态学、地理学等领域的研究工作。E-mail: rhwang@nuist.edu.cn
丁玉华(1987~), 女, 硕士研究生, 主要从事景观生态方面的研究。E-mail: ziluo dinghan@126.com

收稿日期: 2010-12-31 接受日期: 2011-05-31

Key words Landscape geochemistry, Artificial carbon-sink forest, Soil, Groundwater, Soluble salt, Salinity

(Received Dec. 31, 2010; accepted May 31, 2011)

景观地球化学是研究地表景观中的化学元素在岩石、土壤、植被等景观中的分布、迁移、富集过程和机制, 以及与地形、大气、地表水、地下水、土壤、岩石、植物、动物界和人类活动以一定形式相结合而相互作用产生的面貌相关性的学科。其研究对象是景观, 研究任务是对景观中所有组成要素(岩石、地下水、地表水、土壤和植被等)进行综合性的元素迁移与景观研究^[1]。其对环境地球化学背景调查、生物地球化学区划和矿产地球化学勘察等研究具有重要的理论和实际意义^[2-5]。近年来, 国内外景观地球化学研究发展迅速。国外普遍加强了景观地球化学方面表生作用下与矿化有关元素地球化学行为的研究^[6], 这为研究原生异质与次生异质的关系提供了有效途径。我国的景观地球化学研究工作始于20世纪70年代末, 其研究内容主要包括: 景观地球化学区划、特定区域矿床的地球物理、地球化学分异和痕量元素在土壤、植被、水等介质中的分布、富集和迁徙规律等^[7]。目前, 对土壤可溶性盐分离子、地下水化学组分特征与规律和水盐耦合作用下景观格局变化等的研究, 已成为干旱区景观地球化学研究的热点问题。许多学者对此进行了深入研究。具体研究的科学问题主要包括: 绿洲土壤水盐耦合关系下的景观地球化学特征^[8], 盐渍化土壤地球化学特征因子时空分布特征^[9-10], 人工措施改良后的盐渍化土壤地球化学特征^[11-12], 土壤含盐量、地下水矿化度和地下水埋深三者的耦合关系问题^[13], 干旱区绿洲及冲积平原地下水化学特征与时空演变规律^[14-16], 自然因素和人为活动影响下的地下水矿化度变化特征^[17-18], 地下水化学过程对深层渗透水的影响模拟^[19], 以及生态脆弱带景观结构与生态耦合关系^[20]等。这些研究都为干旱区景观地球化学特征与规律研究提供了理论依据和技术支持。随着3S技术的发展, 在综合运用景观生态学理论和地理信息系统方法的基础上, 推动景观地球化学研究在农业生产、环境评价和资源开发等方面的实践将成为趋势。克拉玛依碳汇林基地位于古尔班通古特沙漠南缘, 此区域最严重的问题是土壤盐渍化。鉴于对这一地区碳汇林的景观地球化学规律与特征的研究较少, 因此研究克拉玛依人工碳汇林区的景观地球化学特征及规律, 对认识这一地区土壤可溶性盐分离子和地下水化学组分分布规律和变化机制, 以及景观格局的变化具有重要意义。同时对林区规划设计、盐渍化土壤恢复和风沙防治具有一定的指导作用。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

克拉玛依人工碳汇林区位于准噶尔盆地西北边缘的湖积平原, 地处 $E84^{\circ}57'1.8''\sim 85^{\circ}5'19.5''$ 和 $N45^{\circ}23'15.24''\sim 45^{\circ}30'38.7''$ 之间, 海拔 258~276 m。地势西南高东北低, 自然坡度为 0.26%, 部分地区分布有沙丘。属典型温带大陆性干旱荒漠气候, 降水量少, 蒸发量大, 冬夏温差大, 日照时间长。年平均总降水量 105.3 mm, 蒸发量为 3 545 mm, 7 月份和 1 月份的平均气温之差为 43.6 $^{\circ}\text{C}$ 。年平均风速是 3.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大多为西北风, 春季多大风, 风沙灾害严重。无霜期长, 年平均为 225 d。研究区总面积约 6 700 hm^2 , 土壤 pH 平均为 7.842, 属于偏碱性土壤, 土壤质地类型主要有沙土、壤土、沙壤土、黏土。研究区内主要人工植被以俄罗斯杨(*Populus russkii*)、新疆杨(*Populus bolleana*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)、榆树(*Ulmus pumila*)为主。主要的灌溉方式有漫灌、喷灌和滴灌。原生植被主要有: 怪柳(*Tamarix chinensis*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和芦苇(*Phragmites japonica*)等。

1.2 研究方法

于2010年8月13~22日对克拉玛依人工碳汇林区进行实地调查和野外采样。相关采样方法和试验方法如下: 根据研究区遥感影像资料, 结合碳汇林区监测井的地理坐标, 运用手持GPS进行定位。选择典型区域监测井14眼, 并取其水样。在部分监测井旁选取土壤、植被具有代表性特征的10 $\text{m}\times 10\text{ m}$ 样地共10个。在每个样地内取1个1 $\text{m}\times 1\text{ m}$ 区域挖取土壤剖面, 每个剖面均按0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm进行分层取土样。并调查记录样地内植被类型、生长状况、郁闭度、盖度等数据。对土样盐分进行测定, 测定内容主要包括土壤全盐、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、pH等。并测定地下水样化学组分, 项目包括: 地下水矿化度、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、pH等, 主要分析方法均采用常规分析法。土壤水溶性盐总量和地下水矿化度的测定方法为残渣烘干-质量法, 碳酸根和碳酸氢根的测定采用双指示剂中和法, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的测定采用EDTA络合滴定法, 氯离子的测定采用 AgNO_3 滴定法, K^{+} 和 Na^{+} 的测定采用火焰光度法,

SO_4^{2-} 的测定采用 EDTA 间接滴定法, pH 测定采用电位测定法。

用 SPSS、Excel 等工具和统计软件对数据进行处理和分析。

2 结果与讨论

2.1 碳汇林区土壤元素的地球化学特征与规律

2.1.1 土壤盐分离子垂直变化规律

在灌溉方式和蒸发强度等因素的作用下, 土壤经历着不同的脱盐和积盐过程。不同离子在土壤中具有不同的迁徙过程, 并随土层深度变化表现出不同的变化规律^[21]。土壤盐分离子含量的变异系数在一定程度上反映了盐分离子在不同层次垂向剖面的变化程度^[22]。由于本研究野外采样是在 8 月中旬进行, 正值这一地区降水多、蒸发强度大的季节, 故离子运动较为活跃, 因此离子含量表现出很强的变异性。

从样地 0~100 cm 土层土壤盐分数据统计特征值分析的结果(表 1)可以看出, 被测的 8 个项目中只有土壤 pH 和 HCO_3^- 含量在每层的变异系数相对较小, 表明其在土壤可溶性总盐中的含量相对稳定。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 在 0~80 cm 范围内表现出 4 次强变异(变异系数大于 100%), 表明这几种离子在强烈的蒸发作用下运移活跃。就阴离子的变异而言, Cl^- 变异程度最激烈, SO_4^{2-} 次之, HCO_3^- 最小。阳离子中 Ca^{2+} 的变异程度最显著。在 80~100 cm 范围内, 土壤总盐和各离子变异系数相对较小, 这是由于深层土壤渗透条件较差、受蒸发影响较小。由于地下水补给的盐分含量远不能弥补向上层土壤运移的量, 致使深层离子含量相对于上层较低, 从而使各离子含量在不同深度产生较大差异。

0~100 cm 深度范围从上至下各土层 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 分别为 0.26、0.04、0.08、0.05、0.13, 根据 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} \leq 0.5$ 为硫酸盐型盐土的分类方法^[23]可知, 该地区盐土

类型主要是硫酸盐型。 $\text{HCO}_3^-/(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 比值均小于 1, 说明碳酸盐和重碳酸盐是土壤盐分的次要成分^[24]。土壤总盐分最大值出现在 0~20 cm 土层, 这可能是由于本试验在 8 月中旬进行, 该季节气温高、蒸发量大, 强烈的蒸发作用导致了土壤中的水分亏损, 同时降水也不足以淋洗地表盐分, 导致土壤表面严重的集盐过程。在一些样地的土壤表面可以观察到 0.5~1 cm 厚的盐霜, 这在一定程度上反映出该地区土壤盐分表聚现象普遍, 这一现象和该地区气候条件如降水稀少、蒸发强烈等密切相关。

2.1.2 表层土壤盐分离子的相关性

土壤盐渍化地球化学过程的核心是土壤中盐分离子的迁移、积累和转化^[25]。在盐渍化土壤中, 不同离子之间以及与总可溶性盐的内在关联性存在差异。分析土壤可溶性盐与其组分子间的线性关系, 有助于认识不同条件下的土壤盐分累积规律。

由表 2 可知: 土壤可溶性总盐与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 相关性极为显著, 相关系数均大于 0.9; 其次是 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ; 阴离子中的 SO_4^{2-} 和阳离子中的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与土壤可溶性总盐呈极显著相关性, 这与表层土壤中这 2 类离子含量比较高有关。说明这几种离子对土壤可溶性总盐有显著的贡献作用。其中, Na^+ 主要来自于阳离子交换($\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$) 和自然界中斜长石等含钠矿物的风化溶解^[26]。研究区长期使用地下水灌溉, 地下水含有丰富的 Na^+ , 在灌溉过程中, 水中的 Na^+ 与土壤中的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 进行离子交换, 导致 Na^+ 在表层土壤中富集^[27]。由表 2 可知 HCO_3^- 与其他离子、总可溶性盐之间呈负相关关系, 即一种离子随着另外一种离子含量的增加而减少, 根据 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$, HCO_3^- 与 Ca^{2+} 发生反应形成 CaCO_3 沉淀, 使土壤中 Ca^{2+} 浓度减少。反之亦然。

表 1 克拉玛依人工碳汇林区 0~100 cm 土层土壤盐分离子含量和总盐含量的统计特征
Table 1 Statistical characters of soil salt ions contents and total salinity within 0~100 cm soil layer in Karamay artificial carbon-sink forests

土层深度 Soil depth (cm)	项目 Item	pH	HCO_3^- ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cl^- ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SO_4^{2-} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca^{2+} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mg^{2+} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总盐 Total salinity ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0~20	均值 Mean	7.88	0.22	0.54	1.22	0.26	0.06	0.63	2.99
	变异系数 CV (%)	5.96	18.55	225.14	122.79	134.35	116.07	161.98	121.57
20~40	均值 Mean	7.92	0.23	0.22	1.46	0.41	0.07	0.35	2.78
	变异系数 CV (%)	6.14	26.72	175.58	115.62	139.01	111.76	114.94	87.91
40~60	均值 Mean	7.78	0.22	0.15	1.39	0.41	0.05	0.29	2.64
	变异系数 CV (%)	5.05	37.95	133.33	156.71	211.03	116.00	65.98	131.63
60~80	均值 Mean	7.72	0.23	0.09	1.54	0.45	0.05	0.28	2.76
	变异系数 CV (%)	6.10	36.05	105.38	150.81	207.13	96.30	68.59	129.01
80~100	均值 Mean	7.92	0.21	0.10	0.73	0.13	0.04	0.28	1.51
	变异系数 CV (%)	33.00	26.67	83.16	82.72	53.38	83.33	81.59	65.52

2.2 碳汇林区地下水水文地球化学特征与规律

2.2.1 地下水矿化度化学组分的变化规律

地下水矿化度是地下水各组分浓度变化的总指标,能够反映出地下水中各物质组分的变化规律和分布特征。地下水矿化度含量的变异系数在一定程度上

反映了矿化度组分在不同水平水埋深条件下的变化程度。这些变化是离子本身迁徙和研究区自然地理条件、气候条件综合作用的结果。离子含量变异系数越大,表明其分布越不均匀^[28]。对研究区 14 口监测井的地下水矿化度组分进行统计分析,结果如表 3 所示。

表 2 克拉玛依人工碳汇林区表层土壤(0~20 cm)盐分离子和总盐含量相关系数矩阵
Table 2 Correlative matrix of soil salt ions contents and total salinity within 0~20 cm soil layer in Karamay artificial carbon-sink forests

项目 Item	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	pH	总盐 Total salinity
HCO ₃ ⁻	1.000							
Cl ⁻	-0.467	1.000						
SO ₄ ²⁻	-0.564	0.842**	1.000					
Ca ²⁺	-0.648*	0.733*	0.842**	1.000				
Mg ²⁺	-0.474	0.912**	0.790**	0.827**	1.000			
Na ⁺ +K ⁺	-0.394	0.855**	0.903**	0.624	0.742*	1.000		
pH	0.139	0.261	0.200	-0.115	0.012	0.455	1.000	
总盐 Total salinity	-0.564	0.903**	0.976**	0.770**	0.802**	0.952**	0.333	1.000

*和**分别表示相关性达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$) * and ** indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

表 3 克拉玛依人工碳汇林区地下水矿化度组分统计特征
Table 3 Statistical characters of groundwater salt ions composition and salinity in Karamay artificial carbon-sink forests

项目 Item	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	pH	矿化度 Mineralization
最小值 Minimum (g·kg ⁻¹)	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01	0.05	6.06	0.29
最大值 Maximum (g·kg ⁻¹)	0.55	24.94	9.43	1.35	3.02	14.28	8.15	54.46
均值 Mean (g·kg ⁻¹)	0.27	5.51	2.63	0.37	0.52	3.54	7.47	13.31
标准差 Std (g·kg ⁻¹)	0.15	8.56	3.13	0.44	0.81	5.02	0.50	18.34
变异系数 CV (%)	52.8	155.3	119.3	118.1	156.8	141.8	6.7	137.8

由表 3 可知,地下水的 pH 均值为 7.47,呈弱碱性。地下水 pH 变异系数最小,说明地下水酸碱性比较稳定。阴离子中 Cl⁻的变异系数最大, HCO₃⁻的变异系数最小。阳离子中 Mg²⁺的变异系数最大, Ca²⁺的变异系数最小。Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺+K⁺都表现出很强的变异性,变异系数均大于 100%,表明这几种离子在地下水中的质量浓度变化比较大,这可能是因为 8 月的蒸腾蒸发量大于降水量,在地下水补给上层土壤的过程中,盐分运动强烈,导致离子含量出现较大的变动。其中, Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺+K⁺的平均值和标准差都较大,反映其在地下水中的绝对含量较大,为地下水中的主要阴离子和阳离子,是决定地下水盐化作用的主要变量。

2.2.2 地下水矿化度化学组分的相关性

地下水矿化度是表征水文地球化学作用过程的重要参数,分析地下水矿化度和各组分之间的相关性,确定地下水主要离子,有利于了解地下水的水化学类型。表 4 是利用线性函数拟合得出的地下水矿化度和各离子之间的线性方程和相关系数。

从表 4 可以看出,随着地下水矿化度的增加, SO₄²⁻、Na⁺+K⁺、Cl⁻的增加速率依次增大。由表 4 中的相关系数可知, SO₄²⁻、Cl⁻、Na⁺+K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺

表 4 地下水矿化度与矿化度组分之间的线性方程和相关系数

Table 4 Linear equations and correlation coefficients between groundwater salinity and each ion content

离子 Ion	线性方程 Linear equation	相关系数 Correlation coefficient
SO ₄ ²⁻	$y=0.152\ 1x+0.930\ 7$	$R^2=0.888\ 3$
Cl ⁻	$y=0.472\ 9x-1.111\ 2$	$R^2=0.988\ 6$
HCO ₃ ⁻	$y=-0.000\ 4x+0.326\ 5$	$R^2=0.000\ 3$
K ⁺ +Na ⁺	$y=0.274\ 2x-0.145\ 8$	$R^2=0.996\ 0$
Mg ²⁺	$y=0.042\ 4x-0.040\ 4$	$R^2=0.907\ 4$
Ca ²⁺	$y=0.021\ 8x+0.404\ 0$	$R^2=0.911\ 5$

与地下水矿化度存在着比较好的线性关系,其中 Cl⁻、Na⁺+K⁺最为显著。HCO₃⁻与地下水矿化度之间的线性关系不显著。地下水矿化度组分中对矿化度起主要作用的阳离子是 Na⁺+K⁺,其次是 Mg²⁺;主要的阴离子是 Cl⁻和 SO₄²⁻, HCO₃⁻在地下水矿化度含量的比重不大。这也表明研究区地下水苏打含量较低,氯化物含量较高。阴离子中 Cl⁻在地下水组分中所占的比例大于 SO₄²⁻,是地下水组分中起主要作用的离子。根据舒卡列夫分类法,对该研究区水化学类型划分,可得出本研究区主要的水化学类型是: Cl-SO₄-Na。

2.3 碳汇林区植被的景观地球化学特征与规律

克拉玛依人工碳汇林区靠近古尔班通古特沙漠,

其基质主要为荒漠土成分, 土壤含盐量高, 有机质低。由于防护林具有强大的根系, 树木根系的穿透作用可以使土壤结构趋于良好, 透水性增强, 促进土壤脱盐, 削弱毛管上升水流, 抑制土壤返盐^[29]。因此在这一地区经过一定的人工措施如植树造林, 可以减少可溶性盐分在土壤中的积聚。各种植物对土壤盐渍化的响应各异, 不同林分类型对土壤盐分改良效果有一定的差异, 不同树龄的树木对盐碱化的抗性和对土壤盐分的吸收作用也不同。根据实地调查数据得出研究区林分组成情况及生长年限如表 5 所示。

表 5 克拉玛依人工碳汇林区林分组成及生长年限
Table 5 Stand types and growth years in Karamay artificial carbon-sink forests

样方编号 Code of plot	样方树种组成 Species composition of plot	株数 Quantity (plant·100m ⁻²)	树龄 Age (a)
K001	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	59	1
	柽柳 <i>T. chinensis</i>	4	1~2
	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	8	1~2
K002	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	15	7~8
	新疆杨 <i>P. bolleana</i>	7	3
K003	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	41	7~8
K004	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	31	7~8
	柽柳 <i>T. chinensis</i>	1	2~3
K005	枸杞 <i>Lycium barbarum</i>	5	2~3
	白蜡 <i>F. chinensis</i>	8	7~8
K006	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	28	野生 Wild
K007	柽柳 <i>T. chinensis</i>	14	6
	榆树 <i>U. pumila</i>	2	野生 Wild
K008	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	55	5~6
	柽柳 <i>T. chinensis</i>	2	野生 Wild
K009	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	55	5~6
	柽柳 <i>T. chinensis</i>	8	野生 Wild
K010	俄罗斯杨 <i>P. russkii</i>	86	5~6
	柽柳 <i>T. chinensis</i>	4	野生 Wild

2.3.1 不同林分类型碳汇林的土壤可溶性盐分变化

取 K005(白蜡为主要植被类型)、K007(柽柳为主要植被类型)、K008(俄罗斯杨为主要植被类型)3 个样地类型与原始荒漠区的 K006(梭梭为主要植被类型)样地进行土壤盐分对照, 结果见表 6。结果表明: 以白蜡、柽柳、俄罗斯杨为主要植被类型的 K005、K007、K008 样地土壤可溶性总盐含量均比对照

K006 样地明显降低。这是由于土壤中的盐分积累与蒸发、灌溉、排水密切相关, 样地土壤在周期性灌溉淋洗作用下发生脱盐, 同时植物根系从土壤中吸收大量水分, 降低了地下水位, 从而抑制土壤积盐和返盐等土壤盐渍化。沙漠地区一直处于强蒸发状态, 很少有淋洗过程, 其盐离子运移趋势主要以聚积为主。这表明防护林对土壤盐渍化有一定的改良作用。对土壤可溶性盐离子进行分析得出: 除 HCO₃⁻ 含量有轻微上升外, 其他几种离子的含量在栽植人工林后均有减小的趋势。其中 SO₄²⁻ 含量的降低趋势最为明显。

表 6 克拉玛依人工碳汇林区不同林分类型碳汇林的土壤可溶性盐分含量

Table 6 Soil salinity and salt ions contents analysis of different stand types of Karamay artificial carbon-sink forests

样方编号 Plot code	总盐 Total salinity	g·kg ⁻¹					
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
K006	7.18	0.16	0.32	4.33	1.55	0.13	0.33
K007	1.73	0.32	0.22	0.61	0.12	0.04	0.37
K005	2.27	0.19	0.09	1.29	0.34	0.05	0.27
K008	1.63	0.20	0.08	0.84	0.15	0.05	0.26

2.3.2 不同树龄碳汇林的土壤可溶性盐分变化

选取主要植被类型为 1 年生俄罗斯杨的 K001 样地和主要植被类型为 7~8 年生俄罗斯杨的 K003 样地与原始荒漠区的 K006 样地作对比, 分析不同树龄的碳汇林对土壤盐分的吸收作用。由表 7 可知表层土壤(0~20 cm)的可溶性总盐降低程度最为明显。土壤可溶性盐分离子中, 除 HCO₃⁻ 含量有轻微上升外, Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺ 含量均呈下降趋势, 其中 SO₄²⁻ 含量的下降趋势最为显著。7~8 年生俄罗斯杨林样地表层土壤的可溶性盐总量低于 1 年生俄罗斯杨林样地。除 HCO₃⁻ 含量外, 7~8 年生俄罗斯杨林样地所有土壤可溶性盐离子均低于 1 年生俄罗斯杨林样地。土壤下层(20~100 cm)的可溶性盐总量也呈明显降低趋势。除 HCO₃⁻ 和 Na⁺+K⁺ 外, 其他所有可溶性盐离子含量均有降低, 其中 SO₄²⁻ 表现最为明显。7~8 年生俄罗斯杨林样地土壤下层的可溶性盐总量低于 1 年生俄罗斯杨林样地, 除 HCO₃⁻、Mg²⁺ 和 Cl⁻

表 7 克拉玛依人工碳汇林区不同树龄碳汇林的土壤可溶性盐分分析

Table 7 Soil salinity and salt ions contents analysis of different growth years of trees in Karamay artificial carbon-sink forests

土层深度 Soil depth (cm)	树龄 Age (a)	总盐 Total salinity	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
0~20	对照 CK	7.61	0.18	0.40	4.69	1.22	0.17	0.09
	1	1.07	0.24	0.04	0.48	0.13	0.04	0.14
	7~8	0.61	0.26	0.03	0.16	0.08	0.02	0.08
20~100	对照 CK	7.08	0.16	0.30	4.24	1.63	0.12	0.19
	1	1.61	0.21	0.03	0.90	0.20	0.05	0.21
	7~8	1.26	0.24	0.04	0.74	0.13	0.05	0.03

含量轻微上升外, 7~8年生俄罗斯杨林样地土壤下层可溶性盐分离子均低于1年生俄罗斯杨林样地。随种植年限的增长, 土壤可溶性总盐含量明显降低。

3 结论

景观地球化学研究化学元素在地表景观区中的分布、迁移和富集规律。克拉玛依人工碳汇林区的景观地球化学特征和变化规律是多种物质体系、能量体系和功能体系共同作用的结果, 各种因子共同作用下的地球化学元素在碳汇林区的土壤、地下水和植被等景观中表现出的特征和变化规律如下:

(1) 研究区土壤阳离子主要是 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Ca^{2+} , 主要阴离子是 SO_4^{2-} 。土壤中盐分随水分的强烈蒸发而向上积聚, 表聚现象严重, 表层中硫酸盐占优势。该地区土壤盐类主要为硫酸盐-氯化物型及氯化物型。土壤盐分离子在上层(0~80 cm)土壤中表现出很强变异性。其中土壤可溶性总盐与 SO_4^{2-} 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 有比较显著的相关性。这一现象也说明土壤盐分类型主要与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 SO_4^{2-} 含量有关。

(2) 地下水矿化度及其组分在水埋深增加的过程中均表现出很强的变异性(除 HCO_3^- 外), 地下水矿化度差异较大。研究区的水化学类型多为 $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{Na}$, 在阴离子中, SO_4^{2-} 和 Cl^- 占主要地位, 且含量与地下水矿化度的相关系数极为显著。在阳离子中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 占优势, 含量亦与地下水矿化度相关性显著, 相关系数大于 0.9。 HCO_3^- 与地下水矿化度的相关系数小, 对矿化度的贡献度亦小。

(3) 在土壤盐分条件不同的情况下, 植被表现出不同的景观地球化学特征。不同林分种类样地的土壤可溶性盐分离子呈现出不同的变化规律。改造后的荒漠区, 土壤可溶性总盐明显降低, 说明种植的树木对盐碱地有一定的改良作用。随着种植年限的增加, 土壤盐分含量也呈下降趋势。

参考文献

- [1] 徐德兰, 曾勇. 景观地球化学研究现状与进展[J]. 江苏地质, 2003, 27(3): 159-163
- [2] 杨向荣, 张晓帆, 吴兆宁, 等. 新疆表壳元素地球化学特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 340-345
- [3] 叶玮. 中国西风区黄土常量元素地球化学行为与古环境[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 23-29
- [4] 谢宏琴, 贾国东, 彭平安, 等. 艾比湖二千年来环境演变的地球化学记录[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 205-209
- [5] 顾娇杨, 滕家欣, 冯治汉. 甘肃地球化学景观特征及区域地球化学方法技术评价[J]. 西北地质, 2003, 30(5): 114-115
- [6] 尹昭汉. 景观地球化学[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 63-64
- [7] 黄青, 李丹丹. 塔里木河干流景观地球化学特征及影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 88-92
- [8] 王让会, 宁虎森, 赵振勇, 等. 绿洲土壤水盐耦合关系及景观地球化学特征[J]. 南京信息工程大学学报, 2009, 1(2): 97-101
- [9] 古丽格娜·哈力木拉提, 阿布都沙拉木·加拉力丁, 海米提·依米提, 等. 新疆于田绿洲盐渍化土壤盐分动态变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 100-104
- [10] Wongpokhom N, Kheoruenromne I, Suddhiprakarn A, et al. Geochemistry of salt-affected aqualfs in northeast Thailand[J]. Soil Science, 2008, 173(2): 143-167
- [11] Laudicina V A, Hurtado M D, Badaluco L, et al. Soil chemical and biochemical properties of a salt-marsh alluvial Spanish area after long-term reclamation[J]. Biology Fertile Soils, 2009, 45(7): 691-700
- [12] Ammari T G, Tahboub A B, Saoub H M, et al. Salt removal efficiency as influenced by phyto-amelioration of salt-affected soils[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2008, 6(3/4): 456-460
- [13] 张江辉. 干旱区土壤水盐分布特征与调控方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010
- [14] 蔺娟, 艾尼瓦尔·买买提, 地里拜丹·苏力坦. 新疆盐渍化区土壤盐分离子的空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 184-187
- [15] 姜凌, 李佩成, 郭建青. 贺兰山西麓典型干旱区绿洲地下水水化学特征与演变规律[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 285-290
- [16] 丁宏伟, 张举. 河西走廊地下水水化学特征及其演化规律[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 24-28
- [17] Gundogdu K S, Aslan S T. Effects of irrigation system management turnover on water table depth and salinity of groundwater[J]. Environment Biology Journal, 2007, 28(2): 455-459
- [18] Farber E, Vengosh A, Gavrieli I, et al. The geochemistry of groundwater resources in the Jordan Valley: The impact of the Rift Valley brines[J]. Applied Geochemistry, 2007, 22(3): 494-514
- [19] Lin Y W, Garcia L A. Development of a hydro-salinity simulation model for Colorado's Arkansas Valley[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(6): 757-767
- [20] 宋长春, 邓伟, 宋新山, 等. 松嫩平原西部生态脆弱带景观结构与生态耦合分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1464-1468
- [21] 付秋萍, 张江辉, 王全九, 等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(8): 1091-1097
- [22] 张红, 杨建峰, 张光新, 等. 苏打盐渍土剖面盐分动态变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 117-122
- [23] 余敦和. 灌区土壤盐渍化现状及改良、防治措施建议[J]. 甘肃农业, 2004(11): 65-66
- [24] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽. 渭干河—库车河三角洲绿洲盐渍化土壤特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 146-151
- [25] 李天杰, 郑应顺, 王云. 土壤地理学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1983
- [26] 石培泽, 马金珠, 赵华. 民勤盆地地下水地球化学演化模拟[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 305-309
- [27] 王琪, 史基安, 赵兴东, 等. 石羊河流域地下水地球化学特征演化的计算机模拟研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 161-164
- [28] 陈小兵, 周宏飞, 张学仁, 等. 新疆喀什噶尔冲积平原区地下水水化学特征[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 75-79
- [29] 阿迪力·吾彼尔, 袁素芬, 赵万羽. 准噶尔盆地新建防护林对林下土壤理化性状的影响[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 420-425