

北疆农区土壤盐渍化遥感监测及其时空特征分析

陈 实,徐 斌,金云翔,黄银兰,张文博,郭 剑,申 格,杨秀春

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部农业信息技术重点实验室,北京 100081)

摘要:基于MODIS数据,利用归一化植被指数和盐分指数的二维特征空间关系建立土壤盐渍化遥感监测模型,对北疆农区2000年以来的土壤盐渍化状况及其空间动态变化进行了监测分析,并探讨了典型区土壤盐渍化的主要驱动因素。结果表明:①土壤盐渍化遥感监测指数可以从宏观上定量刻画北疆农区的土壤含盐量;②北疆农区土壤盐渍化空间特征呈现出总体上逆转、局部严重发展的态势;③土壤盐渍化等级在不同时间段的发展或逆转的方向主要由中度向重度及重度向盐土间的相互转化,其中重度盐渍化农用地的转化幅度最大;④不同土壤盐渍化等级中盐土的形成与农区降水量和干燥程度具有较好的相关性,未盐渍化(正常)和中度盐渍化与农区有效灌溉面积和农作物播种面积分别呈相关系数较高的正相关和负相关。

关键词:盐渍化;时空特征;遥感监测;北疆农区

中图分类号: TP79;S153

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2015)12-1607-09

土壤盐渍化通常出现在气候干旱半干旱、土壤蒸发强度大、地下水位高且含有较多的可溶性盐类的地区^[1]。近年来北疆农区因微咸水灌溉等引起的土壤次生盐渍化,加剧了土壤盐渍化程度^[2],严重降低了农区农业生产水平,制约了农区的生态环境和农业可持续发展。借助遥感技术可及时获取土壤盐渍化时空动态变化信息,对盐渍化防治、生态保护及农业可持续发展至关重要^[3]。

目前,利用遥感技术和数据的优势,可从定性和定量层面开展土壤盐渍化遥感监测。定性研究表现在利用目视解译提取遥感图像中盐渍化信息^[4-6],对多光谱影像进行数学变化以突出盐渍化信息^[7],综合盐渍土的光谱特征和纹理特征等辅助量进行自动化分类^[8],分析土壤盐渍化时空动态变化特征^[9,10]。土壤盐渍化的定量研究多利用高光谱遥感数据中光谱的细微特征来对地物进行定量分析^[11],对土壤高光谱数据进行光谱变换和分析^[12],选取与土壤盐分数据相关性最好的变换形式及响应波段,建立最优高光谱指数^[13],通过精度检验,构建土壤盐渍化定量反演模型^[14],实现对土壤盐渍化的高精度监测^[15];也可利用多光谱遥感影像引入与

土壤盐渍化密切相关的盐分指数和地表反射率,构建土壤盐渍化信息提取模型,借助决策树分类方法提取土壤盐渍化分布信息^[16]。但是受气候干湿季节的影响,仅从裸土光谱信息定量监测土壤盐渍化并不能反映真实情况,综合考虑遥感图像元内的裸土和植被信息,可以提高盐渍化信息提取的精度^[17];从遥感数据中计算出归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)和盐分指数(SI, Salinity Index)组成二维特征空间,能高精度的定量反演盐渍化土壤地表含盐量^[18]。

在利用遥感手段定量分析和监测土壤盐渍化时,学者们多利用 Landsat TM/ETM+/OLI 等遥感数据定量分析和监测土壤盐渍化特征,取得了较高的精度,但是在宏观尺度上的研究暂时没有突破。据此,本研究采用时空分辨率较好的 MODIS 09A1 遥感数据和野外实测数据为基础,分析归一化植被指数和盐分指数二维特征空间关系,研究农区地表农作物物理特征对盐渍化的响应,构建农区土壤含盐量与地表农作物物理特征之间的定量关系模型,探讨2000~2014年北疆农区土壤盐渍化时空变化特征,为该农区土壤盐渍化的防治以

收稿日期:2015-07-23;修订日期:2015-09-11

基金项目:新疆生产建设兵团博士资金专项(2012BB001)、国家自然科学基金项目(41571105;31372354)资助。

作者简介:陈 实(1987-),男,安徽省安庆人,硕士,主要从事草原遥感监测和土地退化研究。E-mail: shic11@126.com

通讯作者:杨秀春,研究员。E-mail: yangxiuchun@caas.cn

及农业可持续发展提供科学指导依据。

1 研究区概况

北疆地处天山以北,位于 $80^{\circ}10'47''\text{E} \sim 96^{\circ}27'40''\text{E}$, $40^{\circ}42'29''\text{N} \sim 49^{\circ}11'55''\text{N}$ 之间,包括乌鲁木齐、石河子市、克拉玛依市、塔城地区、阿勒泰地区、吐鲁番地区、哈密地区、昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州、博尔塔拉蒙古自治州10个地区。北疆属于温带大陆性干旱半干旱气候,年均气温 $-4 \sim 9^{\circ}\text{C}$,日平均气温大于 10°C 的温暖期约140~170 d,全年降水量150~200 mm,全年无霜期140~185 d。阿勒泰山与天山形成广阔冲积扇平原,多开垦成农田。由于受冰川和融雪的补给,水量变化稳定,农业用水保证率高。农区栽培作物多为一年一熟,盛产棉花(*Gossypium hirsutum*)、小麦(*Triticum aestivum*)和番茄(*Solanum lycopersicum*)等。土壤类型主要有棕钙土、栗钙土、盐土等。

2 数据与方法

2.1 数据来源

选择2000~2014年农区作物生长旺季第241 d(8月22日~8月29日)的MODIS 09A1数据产品,时间分辨率为8 d,空间分辨率为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$,该数据从美国国家航空航天局网站(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>)下载,行列号为h23v04和h24v04,下载后的影像分别利用MRT(MODIS Reprojection Tools)软件进行影像拼接、数据格式和投影转换等预处理,完成图像的空间拼接和重采样,把HDF格式转换为Tif格式,同时将SIN地图投影转换为Albers Equal Area Conic/WGS84投影,最后采用北疆农区矢量边界裁剪出2000~2014年遥感影像栅格图;气象资料来自中国气象数据共享服务网站(<http://cdc.nmic.cn>)下载的伊犁哈萨克自治州伊宁站和昭苏站的逐日降水量和日均气温数据,数据时间段为1970~2013年;土地利用图来源于西部环境科学数据中心提供的新疆维吾尔自治区2000年1:10万土地利用数据集^[19],从中选取北疆农业用地作为本文研究区;野外实测的数据来源于2013年4月23~28日在石河子农区采样所得的72个土壤盐分样品,采用离子测定法得到其土壤含盐量实测数据。

2.2 研究方法

有学者研究表明^[20],植被生长状况与土壤含盐

量具有高度的相关性,归一化植被指数(NDVI)随着土壤含盐量的增加而减小,可作为判别土壤盐渍化的间接参数;在研究土壤盐分光谱特征时,从波段混合和光谱特征试验发现,遥感图像红波段和蓝波段计算出的盐分指数(SI)能较好的反应土壤盐渍化程度^[21]。本研究采用中等分辨率MODIS 09A1数据产品,通过NDVI和SI构成二维特征空间^[18],建立土壤盐渍化遥感监测模型(SRSI, Salinization Remote Sensing Index),以求在宏观尺度上监测土壤盐渍化特征。

$$NDVI = \frac{b_1 - b_2}{b_1 + b_2} \quad (1)$$

$$SI = \sqrt{b_1 \times b_3} \quad (2)$$

$$SRSI = \sqrt{(NDVI - 1)^2 + SI^2} \quad (3)$$

式中:NDVI为归一化植被指数;SI为盐分指数;SRSI为土壤盐渍化遥感监测指数; b_1 、 b_2 、 b_3 分别为MODIS 09A1中的620~670 nm、841~876 nm、459~479 nm波段反射率值。

3 北疆农区土壤盐渍化时空变化分析

3.1 土壤盐渍化遥感监测模型精度分析

通过筛选剔除异常值后,采用41个地面点的土壤含盐量与相对应在遥感数据 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 像元的反演结果之间进行相关性分析,来验证土壤盐渍化遥感监测指数SRSI的可靠性,通过精度验证得到野外实测土壤含盐量与土壤盐渍化遥感监测指数之间的拟合优度 R^2 达到了0.701(图1),可见利用中分辨率MODIS 09A1数据可以对较大范围的盐渍化信息进行监测反演。

利用土壤盐渍化遥感监测指数值与野外实测土壤含盐量之间构建数学关系模型,推算出农区接近真实的土壤含盐量,最后根据规定的分级标准依次分为非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化和盐土等5个等级^[14,22],得到 $SRSI < 0.3$ 为未盐渍地(正常)、 $SRSI \leq 0.4$ 为轻度盐渍土、 $SRSI \leq 0.5$ 为中度盐渍土、 $SRSI \leq 0.7$ 为重度盐渍化、 $SRSI > 0.7$ 为盐土。

3.2 北疆农区土壤盐渍化时间变化特征分析

按照分级标准,得到北疆农区土壤盐渍化统计面积,2000~2014年北疆农区盐渍化面积呈现出显著的波动减少趋势(图2),决定系数 R^2 达到了0.739,最大下降率达到了17.14%。

基于MODIS 09A1遥感数据,利用土壤盐渍

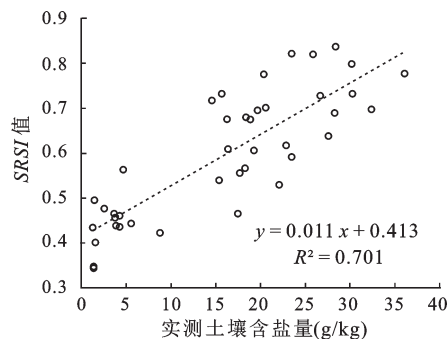


图1 地面实测土壤含盐量与土壤盐渍化遥感监测指数关系

Fig.1 The relationship between ground measured soil salinity and remote sensing monitoring index of soil salinization

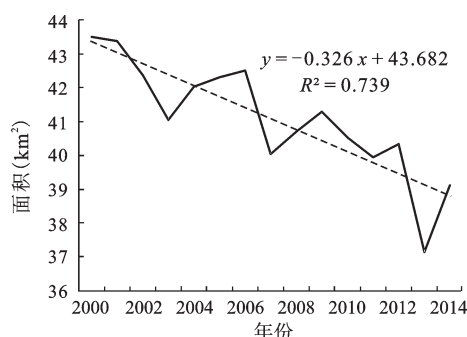


图2 北疆农区2000~2014年土壤盐渍化面积变化

Fig.2 The area change of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang in 2000-2014

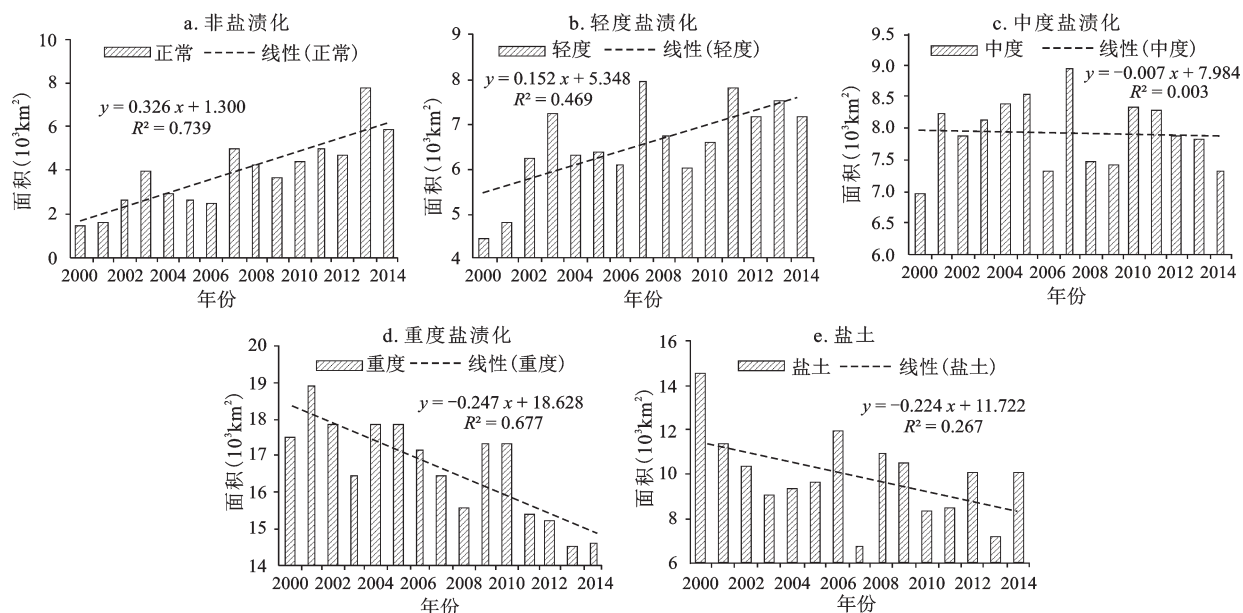


图3 北疆农区2000~2014年不同程度土壤盐渍化变化规律

Fig.3 The change regulation of soil salinization with different degree in agricultural area of northern Xinjiang in 2000-2014

化遥感监测指数得出2000~2014年不同盐渍化等级的变化(图3),可以看出,未盐渍化(正常)的农区耕地面积呈现出显著增加趋势,决定系数 R^2 达到了0.739;轻度盐渍化农区面积也在大幅度增长,决定系数 R^2 为0.469;而中度盐渍化的耕地面积在15 a中基本维持稳定状态;重度盐渍化农区面积表现为大幅减少趋势,决定系数 R^2 达到0.677;盐土耕地面积也在一定程度的缩减,决定系数 R^2 为0.267。

3.3 北疆农区土壤盐渍化空间变化特征分析

为进一步研究北疆农区土壤盐渍化的空间变化情况,分别对非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化和盐土等5个等级进行1~5赋值。根据新疆农业国民经济和社会发展规划的实施情况,选取2000年、2005年、2010年和2014年作为北疆农区土壤盐渍化逆转和发展研究时间段。按照表1对北疆农区土壤盐渍化发展状况进行分级,通过ArcGIS10.0栅格计算器,计算得到研究区土壤盐渍化发展趋势(图4),然后对土壤盐渍化分类图进行统计可得研究区3个时段的土壤盐渍化发展趋势数据,再通过3个不同时段转移矩阵来辅助分析北疆农区土壤盐渍化变化方向。

从表2可以看出,北疆农区土壤盐渍化逆转和明显逆转的总面积2000~2005年、2005~2010年、2010~2014年分别为16 186.25 km²、13 715.25 km²

表1 北疆农区土壤盐渍化发展分级

Table 1 The development classification of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang

明显逆转 ≤ -2	逆转-1	稳定0	发展1	严重发展 ≥ 2
3 \rightarrow 1,4 \rightarrow 1,4 \rightarrow 2	2 \rightarrow 1,3 \rightarrow 2	1 \rightarrow 1,2 \rightarrow 2	1 \rightarrow 2,2 \rightarrow 3	1 \rightarrow 3,1 \rightarrow 4,2 \rightarrow 4
5 \rightarrow 1,5 \rightarrow 2,5 \rightarrow 3	4 \rightarrow 3,5 \rightarrow 4	3 \rightarrow 3,4 \rightarrow 4,5 \rightarrow 5	3 \rightarrow 4,4 \rightarrow 5	1 \rightarrow 5,2 \rightarrow 5,3 \rightarrow 5

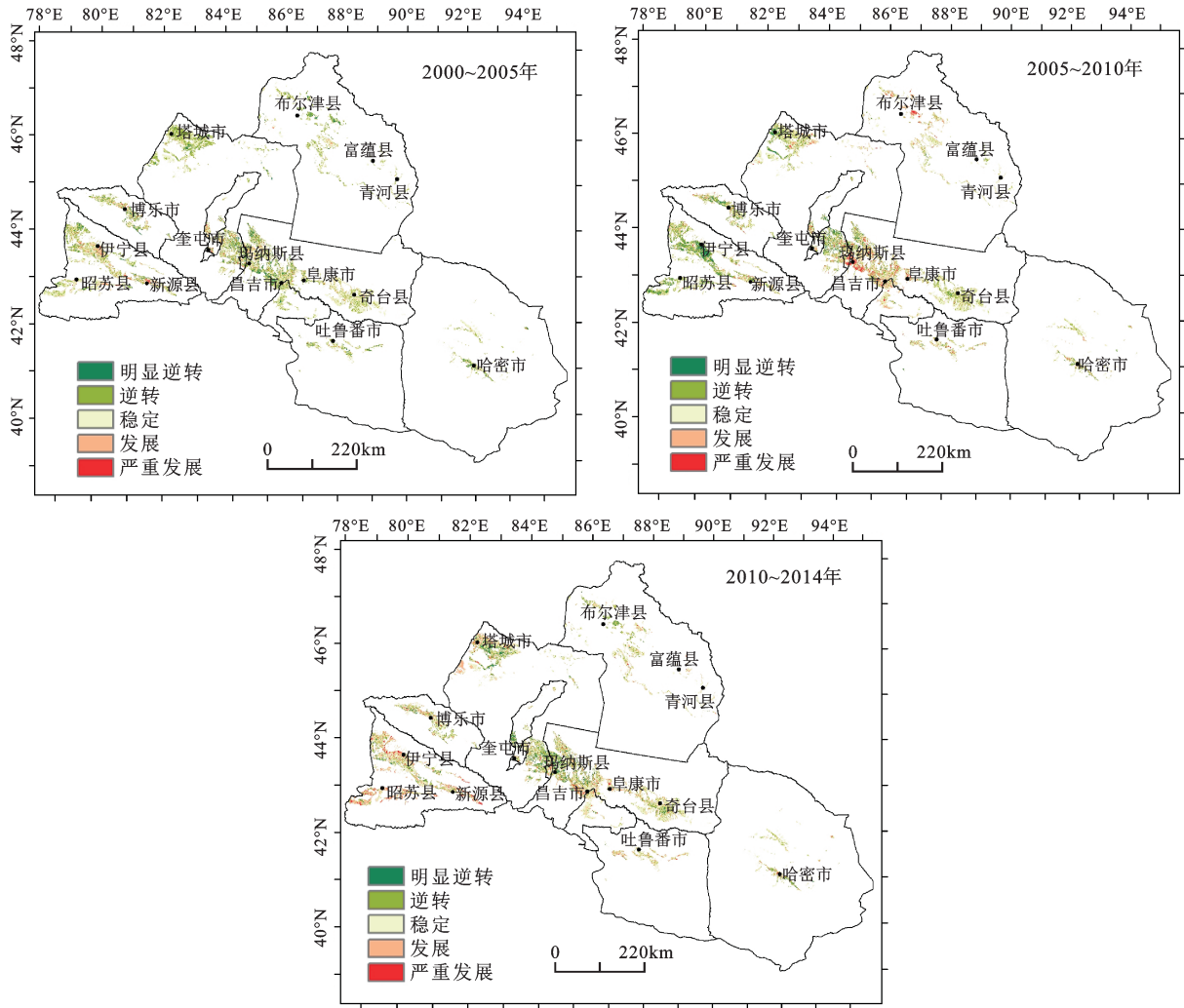


图4 2000~2014年北疆农区土壤盐渍化发展变化

Fig.4 The development and change of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang in 2000-2014

表2 北疆农区不同时期土壤盐渍化发展趋势

Table 2 The development trend of soil salinization at different times in agricultural area of northern Xinjiang

数据指标	2000~2005年		2005~2010年		2010~2014年	
	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)
明显逆转	3200.00	7.11	3437.25	7.64	3150.00	7.00
逆转	12986.25	28.85	10278.00	22.83	8380.50	18.62
稳定	23513.50	52.24	22582.50	50.17	22588.25	50.18
发展	4648.25	10.32	6946.25	15.43	9096.00	20.20
严重发展	665.25	1.48	1769.25	3.93	1798.50	4.00

和11 530.5 km²,占整个北疆农区总面积的比例分别为35.96%、30.47%和25.62%;土壤盐渍化发展和严重发展3个时段的总面积分别为5 313.5km²、8 715.5 km²和10 894.5 km²,比例分别为11.81%、19.36%和24.21%,土壤盐渍化逆转和明显逆转的总面积在3个时段内都大于发展和严重发展的总面积,这说明近15 a来,北疆农区土壤盐渍化总体上呈现逆转趋势。就土壤盐渍化发展和严重发展的面积而言,在3个时段内均呈递增态势,2010~2014年时段内发展和严重发展的面积分别为9 096.00 km²和1 798.5 km²,各占研究区总面积的20.21%和4.00%,几乎为2000~2005年时段内发展和严重发展面积的2倍和3倍,说明近15 a来,研究区局部地区土壤盐渍化严重发展的态势并没有衰减,反而呈现出迅速增加的趋势。这可能是前期土壤盐渍化的整治力度较大,再加上引进膜下滴灌治理的方法,对土壤盐渍化的治理效果较好,后期在盐渍化的防治过程中,由于治理时多采用水利灌溉治理,随着时间的积累导致了次生盐渍化的发生,遏制了盐渍化治理的进程,提高了土壤盐渍化的产生速度。

结合图4及表3可知,2000~2005年,北疆农区土壤盐渍化有所逆转和明显逆转的区域主要分布在塔城市、玛纳斯县、昌吉市、阜康市、吐鲁番市和哈

密市等农区,其中盐渍化等级转化过程为轻度盐渍化向未盐渍化用地转化(1 026.5 km²)、中度向轻度转化(2 169.75 km²)以及重度向轻度转化(1 506.75 km²)。北疆农区土壤盐渍化有所发展和严重发展的区域主要分布在博乐市局部、伊宁市、新源县、昭苏县和奎屯市等地区,主要是未盐渍化转化到轻度(500.75 km²)、轻度转化到中度(1 097 km²)、中度转化到重度(1 535.5 km²)、重度盐渍化盐土转化(1 515 km²)。

结合图4及表4可知,2005~2010年,北疆农区土壤盐渍化发生逆转和明显逆转的区域主要分布在伊宁市、昭苏县和奎屯市等农区,盐渍化逆转的过程主要是重度向中度转化(3 276.75 km²)、中度向轻度转化(2 121 km²)以及轻度向未盐渍化(1 640.25 km²)的转化;北疆农区土壤盐渍化发生发展和严重发展的区域分布在塔城市、玛纳斯县、昌吉市、阜康市和布尔津县等农区,其中未盐渍化到轻度的转化为718.5 km²、轻度向中度的转化为1 584.75 km²,中度向重度的转化为2 472.25 km²,重度向盐土的转化为2 170.75 km²。

结合图4及表5可知,2010~2014年,北疆农区土壤盐渍化有所逆转及明显逆转的区域分布在布尔津县、奎屯市、玛纳斯县和奇台县等农区,主要是轻度向未盐渍化(1 767.25 km²)、中度向轻度

表3 2000~2005年北疆农区土壤盐渍化转移矩阵(km²)

Table 3 The transfer matrix of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang in 2000-2005(km²)

2005年	2000年				
	正常	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
正常	788	1026.5	544.75	268.25	50.5
轻度盐渍化	500.75	1958.75	2169.75	1506.75	214
中度盐渍化	155.75	1097	2613.25	4055.25	615.75
重度盐渍化	35.75	351.5	1535.5	10179	5734.75
盐土	2.5	20.25	99.5	1515	7974.5

表4 2005~2010年北疆农区土壤盐渍化转移矩阵(km²)

Table 4 The transfer matrix of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang in 2005-2010(km²)

2010年	2005年				
	正常	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
正常	1346.5	1640.25	1002.5	442	31.25
轻度盐渍化	718.5	2160.5	2121	1480	140.75
中度盐渍化	366	1584.75	2749.5	3276.75	340.75
重度盐渍化	221.5	903.25	2472.25	10467	3240
盐土	25.5	61.25	191.75	2170.75	5859

(2 021.75km²)以及重度向中度(2 755.75 km²)的转化;北疆农区土壤盐渍化有所发展的区域主要分布在塔城市、博乐市、伊宁市、新源县和昭苏县等地区,这些地区的盐渍化发展主要是未沙化(正常)农用地向轻度(1 125.5 km²)、轻度向中度(1 466.25 km²)、中度向重度(2 777.75 km²)以及重度向盐土(3 726.5 km²)农用地转化。

通过3个时段的土壤盐渍化等级动态变化中可以看出,北疆农区土壤盐渍化发展或是逆转的方向主要由中度向重度及重度向盐土间的相互转化所主导,其中重度盐渍化农地的转化幅度最大,这与前面土壤盐渍化时间变化特征分析得出的结论一致。

4 北疆农区土壤盐渍化变化驱动因素分析

自然因素和人为因素是导致土壤盐渍化的共同结果,通过野外调查问卷和查阅相关资料,认为对农区土壤盐渍化存在影响的自然因素主要有:降水、干燥度、地形地貌、温度、蒸散发等;人为因素主要是农业投资额、农作物播种面积和有效灌溉面积等。本文分别从自然因素和人为因素2个方面探索北疆农区土壤盐渍化的主要驱动因素及其它们之间的关系。

4.1 北疆农区土壤盐渍化的自然因素

近百年来,全球气温正处于上升态势^[23,24],全球性气候的变化必将对干旱以及半干旱地区的气候环境造成影响,特别是在土壤退化方面。本研究以伊犁哈萨克自治州1970~2013年的降水量和积温计算的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、干燥度(Aridity Index, AI)等气候指标研究气象因素对伊犁哈萨克自治州土壤盐渍化的影响。

SPI是利用长时间序列月降水量数据计算出来的指数,能够反映研究区不同时间尺度和区域的旱涝状况,长时间尺度SPI可反映地下水的变化,短时间尺度的SPI可以反映农作物在生长期的水分供给情况^[25,26],本研究利用1970~2013年降水数据计算得到2000~2013年的SPI(图5a),从图中可知2000~2013年伊犁州农区的降水量表现出下降趋势,决定系数 R^2 达到了0.105,2004年降水最为丰富,为降水丰年,2008年降水量最少,为旱年,降水的波动变化在一定程度上影响盐渍化的发展或逆转;干燥度指数可反映某地、某时段水分的收入和支出状况,多运用于气候的干湿状况分析^[27],本研究采用年降水量和年积温,运用干燥度经验计算公式^[28],计算出伊犁州2000~2013年的干燥度(图

表5 2010~2014年北疆农区土壤盐渍化转移矩阵(km²)
Table 5 The transfer matrix of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang in 2010-2014(km²)

2014年	2010年				
	正常	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
正常	2835.75	1767.25	748.25	461.25	56
轻度盐渍化	1125.5	2371.25	2021.75	1473.25	152
中度盐渍化	333.75	1466.25	2488.75	2755.75	259.25
重度盐渍化	141.5	931	2777.75	8887.25	1835.75
盐土	26	85	281.25	3726.5	6005.25

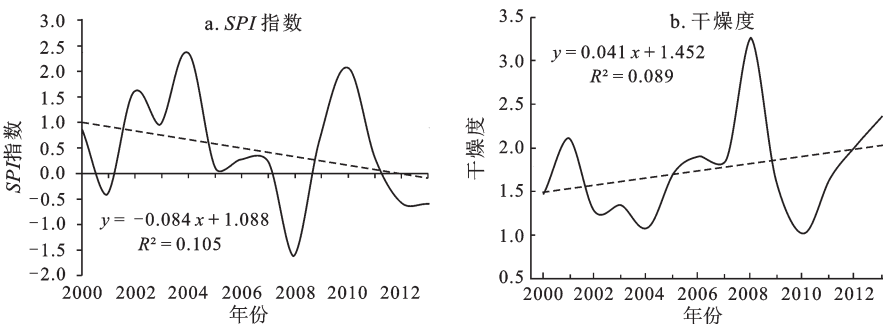


图5 伊犁州农区2000~2013年SPI指数和干燥度变化规律
Fig.5 The change regulation of SPI index and dryness in agricultural area of Yili in 2000-2013

5b),从变化趋势上看,2000~2013年干燥度呈现出上升趋势,决定系数 R^2 为0.089,干燥度的增加有助于农区土壤盐渍化的形成。

为研究SPI指数和干燥度对伊犁州农区不同程度土壤盐渍化的影响,在SPSS软件中分析自然因素SPI指数和干燥度与不同程度土壤盐渍化的相互关系,发现盐土与SPI指数和干燥度相关性较好,与SPI表现为负相关,决定系数 R^2 达到了0.323;与干燥度表现为正相关,决定系数 R^2 达到了0.391。由此可见,盐土的形成与农区降水量和干燥程度关系密切,而未盐渍化(正常)、轻度、中度、重度对降水量和干燥度的敏感性较弱,这可能是因为盐土的形成和转移更容易受降水和气温的影响,降水的减少和干燥度的增强使得在土壤中的水分通过蒸发作用向上运动,土壤毛细作用于水分带动盐分使其上升至地表,水分蒸发散失后,带来的盐分将滞留于土壤表层,从而加速形成土壤盐碱化。因此区域的降水和气温直接影响盐土的产生。

北疆农区土壤盐渍化发生、发展的几率对人类活动具有高度敏感性,能够左右土壤盐渍化的发展方向和发展程度。如果人类的开发利用不合理将会进一步增加土壤盐渍化逆转的阻力,反而将提高农区盐渍化发展的可能性。反之,若是对北疆农区实施一些可抑制盐渍化发展的手段,则

会在一定程度上促进北疆农区土壤盐渍化的逆转。本研究以伊犁哈萨克自治州为例,对其农区土壤盐渍化过程中的人为因素进行分析。

4.2 北疆农区土壤盐渍化的人为因素

土壤盐渍化的发展和逆转与人为因素中有效灌溉面积和农作物播种面积等密切相关,其中有效灌溉面积和农作物播种面积数据来源于2002~2014年新疆统计年鉴^[29]。从图6分析可知伊犁哈萨克自治州农区2001~2006年间有效灌溉面积和农作物播种面积呈现出缓慢增加的趋势,随着膜下滴灌技术的广泛推广,从2007~2013年开始农区有效灌溉面积和农作物播种面积迅速增长,增长比率分别为38.65%和46.22%(图6)。结合农区土壤盐渍化时间变化特征可以看出,有效灌溉面积和农作物播种面积对农区土壤盐渍化程度有减缓作用。在分析不同程度盐渍化与农区有效灌溉面积和农作物播种面积时,发现未盐渍化(正常)和中度盐渍化与农区有效灌溉面积和农作物播种面积的相关系数都较高,其中未盐渍化(正常)与农区有效灌溉面积和农作物播种面积呈正相关,决定系数 R^2 分别为0.23和0.19,中度盐渍化与农区有效灌溉面积和农作物播种面积呈负相关,决定系数 R^2 分别为0.17和0.25(图6)。因此,通过人为作用可影响盐渍化发展或逆转的方向。

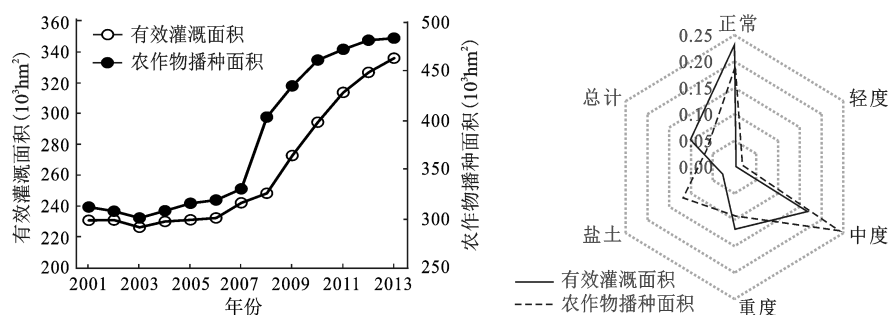


图6 有效灌溉面积和农作物播种面积变化趋势及其与土壤盐渍化的关系

Fig.6 The change trend of effective irrigation area and crop planting area and the relationship between effective irrigation area, crop planting area and soil salinization

5 结论与讨论

5.1 结论

1) 通过野外实测土壤含盐量与土壤盐渍化遥感监测指数相关性分析,得到土壤盐渍化遥感

监测指数SRSI可从宏观上定量描述北疆农区的土壤含盐量。

2) 从2000~2014年不同盐渍化等级的变化可以看出,除中度盐渍化趋势不明显外,未盐渍化(正常)和轻度盐渍化表现出增加趋势,重度盐渍化和盐土呈现出减少趋势。

3) 北疆农区土壤盐渍化发展或是逆转的方向主要由中度向重度及重度向盐土间的相互转化所主导,其中重度盐渍化农地的转化幅度最大。

4) 不同土壤盐渍化等级中盐土的形成与农区降水量和干燥程度极其相关,地区的降水和气温直接影响到土壤盐渍化的产生。

5) 未盐渍化(正常)与农区有效灌溉面积和农作物播种面积分别呈 R^2 为 0.23 和 0.19 的正相关,中度盐渍化与农区有效灌溉面积和农作物播种面积呈 R^2 为 0.17 和 0.25 负相关,可见通过人为作用可影响盐渍化发展的方向。

5.2 讨论

本研究在利用遥感技术监测北疆农区土壤盐渍化特征时,综合考虑了遥感图像像元内的裸土和植被信息,结合盐渍化对植被信息的间接影响,从遥感数据波段计算中组合分析了归一化植被指数和盐分指数形成的二维特征空间,构建了土壤盐渍化遥感监测指数,在实际应用中有着较好的适应性和可靠性。但是北疆农区地表植被覆盖、水热组合复杂多变,严重制约了土壤盐分的有效监测,本文提出的基于 MODIS 数据的监测方法暂时不能完全反映明确的生物物理意义,在今后的研究中如果采用波谱向量空间降维方法和寻找纯净像元作为终端单元的方法,从多维空间上定量提取盐渍化信息^[3],结合地表植被覆盖、水热组合及其变化方面的信息,以探索土壤盐渍化生物物理意义,将会进一步提升遥感定量监测土壤盐渍化的精度;利用遥感手段定量分析和监测土壤盐渍化时,多利用 Landsat TM/ETM+/OLI 等遥感数据定量分析和监测绿洲和流域土壤盐渍化特征^[22,30,31],取得了较高的精度,但是在宏观尺度上的研究暂时没有突破,本研究结论可以为干旱区大尺度盐渍化的定量分析和监测工作提供研究基础。

参考文献:

- [1] 孙 倩,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.干旱区典型绿洲土地利用/覆被变化及其对土壤盐渍化的效应研究——以新疆沙雅县为例[J].地理科学进展,2012,31(9):1212~1223.
- [2] 丁建丽,姚 远,王 飞.干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J].生态学报,2014,34(16):4620~4631.
- [3] 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.
- [4] Dwivedi R S,Rso B R M.The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt-affected soils [J].International Journal of Remote Sensing,1992,13(11): 2051-2058.
- [5] Rao B R M,RaviSankarT,Dwivedi R S,etal.Spectral Behavior of Salt-affectedSoils[J].International of Remote Sensing, 1995, 16 (12):2125-2136.
- [6] Mougnot B,Pouget M,Epema G.Remote sensing of salt-affected soils[J].Remote sensing Reviews,1993,(7):241-259.
- [7] 刘志明,晏 明,何艳芬.吉林省西部土地盐碱化研究[J].资源科学,2004, 26(5):111~116.
- [8] 骆玉霞. GIS 支持下的 TM 图像土壤盐渍化分级[J].遥感信息, 2001,(4):12~15.
- [9] 吉别克·哈力克巴义,丁建丽,谢力扎提·哈布尔.干旱区土地盐渍化时空动态变化及影响因子分析[J].水土保持研究,2011,18 (4):112~116.
- [10] 张源沛,胡克林,李保国,等.银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J].农业工程学报,2009,25(7):19~24.
- [11] 姚 远,丁建丽,张 芳,等.基于高光谱指数和电磁感应技术的区域土壤盐渍化监测模型[J].光谱学与光谱分析,2013,33 (6):1658~1664.
- [12] 姚 远,丁建丽,阿尔达克·克里木,等.基于实测高光谱和电磁感应数据的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(7):1917~1921.
- [13] 关 红,贾科利,张至楠.采用高光谱指数的龟裂碱土盐碱化信息提取与分析[J].红外与激光工程,2014,43(12):4153~4158.
- [14] 陈 实,高 超,徐 斌,等.新疆石河子农区土壤含盐量定量反演及其空间格局分析[J].地理研究,2014,33(11):2135~2144.
- [15] 丁建丽,伍漫春,刘海霞,等.基于综合高光谱指数的区域土壤盐渍化监测研究[J].光谱学与光谱分析,2012,32(7):1918~1922.
- [16] 哈学萍,丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,等.基于 SI-Albedo 特征空间的干旱区盐渍化土壤信息提取研究——以克里雅河流域绿洲为例[J].土壤学报,2009,46 (3):381~390.
- [17] 哈学萍,丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,等.基于 SI-Albedo 特征空间的土壤盐渍化遥感监测指数研究[J].土壤学报,2009,46 (7): 698~703.
- [18] 王 飞,丁建丽,伍漫春.基于 NDVI-SI 特征空间的土壤盐渍化遥感模型[J].农业工程学报, 2010,26 (8):168~173.
- [19] Liu Jiuyan,LiuMingliang,ZhuangDafang,et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995~2000[J]. Science in China(D). 2003, 46(4):373-384.
- [20] 杨劲松,姚荣江,邹 平,等.海涂区不同植被类型下土壤盐渍剖面及其电磁感应响应特征[J].应用生态学报,2008,19(10): 2117~2124.
- [21] 哈学萍,丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,等.基于 SI-Albedo 特征空间的土壤盐渍化遥感监测指数研究[J].土壤学报,2009,46 (4):698~672.
- [22] 王水献,董新光,杜卫东.新疆阿瓦提灌区土壤盐渍化现状及特征分析[J].干旱地区农业研究,2009,24(5):170~175.
- [23] Frame D J, Stone D A I I. Assessment of the first consensus prediction on climate change[J].Nature Climate Change, 2013,3(4): 357-359.
- [24] Meehl G A, Hu A, Tebaldi C, et al. Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus

- sea-level rise[J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(8):576-580.
- [25] 姚俊强,杨 青,胡文峰,等.天山山区空中水汽含量及与气候因子的关系[J].*地理科学*,2013,**33**(7):859~864.
- [26] 袁文平,周广胜.标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比[J].*植物生态学报*,2004,**28**(4):523~529.
- [27] 张 济,杨秀春,李亚云,等.基于干燥度指数的辽西北土地风蚀荒漠化判别[J].*地理研究* 2011,**30**(12):2239~2246.
- [28] 陈效述,郑 婷.内蒙古典型草原地上生物量的空间格局及其气候成因分析[J].*地理科学*,2008,**28**(3):360~374.
- [29] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴 [J].北京:中国统计出版社,2002~2014.
- [30] 杨 帆,王志春,王云贺,等.松嫩平原苏打盐渍土土壤水分特征研究[J].*地理科学*,2015,**35**(3):340~345.
- [31] 韩桂红,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.渭-库绿洲地下水对土壤盐渍化和其逆向演替过程的影响[J].*地理科学*,2012,**32**(3):362~367.

Remote Sensing Monitoring and Spatial-temporal Characteristics Analysis of Soil Salinization in Agricultural Area of Northern Xinjiang

CHEN Shi,XU Bin,JIN Yun-xiang,HUANG Yin-lan,ZHANG Wen-bo, GUO Jian,SHEN Ge,YANG Xiu-chun

(*Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The soil secondary salinization caused by brackish water irrigation and so on in agricultural area of northern Xinjiang aggravated the degree of soil salinization, severely reduced agricultural productivity level. To explore the impact of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang on sustainable development of agriculture, the article used the two-dimensional spatial relationship of normalized difference vegetation index and salinity index to build remote sensing monitoring model of soil salinization based on MODIS Data, and analyzed soil salinization status and the spatial dynamic changes of this area since 2000, then discussed the main driving factors of soil salinization in the typical area. The results showed: 1) Remote sensing monitoring indicators of soil salinization can quantitatively characterize soil salinity in agricultural area of northern Xinjiang from the macro. 2) The spatial characteristics of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang showed a reversal of the overall and local serious development situation. 3) The development or reverse direction of soil salinization levels in different periods was mainly mutual transformation of moderate to severe and severe to the saline soil, and the conversion amplitude of severe salinization agricultural land was maximum. 4) There was a good correlation between formation of saline soil with precipitation and degree of dryness and it turned on high positive and negative correlations between not salinization (normal) and moderate salinization with rural effective irrigation area and crop planting area. The research results can provide scientific basis for the prevention of soil salinization. Research conclusion provided scientific guidance basis for the prevention and treatment of soil salinization in the agricultural area of northern Xinjiang and agricultural sustainable development, and offered certain research foundation in quantitative analysis and monitoring work of large scale salinization in arid areas.

Key words: salinization; spatiotemporal characteristics; remote sensing monitoring; agricultural area of northern Xinjiang