

# 相似降水年组下黄土高原植被恢复与土壤水分变化过程与空间特征分析

王蕾钦<sup>1</sup>, 王飞<sup>1,2</sup>, 李朋飞<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 土壤水分是黄土高原植被恢复及其可持续性的主导限制因子, 为认识退耕还林(草)工程以来大尺度植被恢复与土壤水分关系, 以 25 km×25 km 格点为研究单元, 采用 1992—2013 年逐月降水量、归一化植被指数(NDVI)和土壤水分指数(SWI)等数据, 分析了该区植被恢复与土壤水分变化过程及其区域分布特征。结果表明, 黄土高原植被和土壤水分变化特征和趋势不一致, 其中大部分区域(70%以上面积)NDVI 呈极显著增加趋势( $p < 0.01$ ), 但绝大部分地区(94%面积)的 SWI 没有趋势性变化。为进一步揭示植被和土壤水分变化关系, 以格点为单元提取并分析了相似年组(年降水量差小于 2%, 年差大于或等于 5 年, 逐月降水量相关性大于 0.55), 并分析了不同相似年组内 NDVI 和 SWI 的变化特征。植被指数与土壤水分变化主要包括两类: 植被指数和土壤水分同时增加与植被指数增加而土壤水分减少。黄土高原植被、土壤水分变化的区域性明显, 在未来生态恢复过程中, 需要进一步认识植被恢复对土壤水分的关系, 促进黄土高原植被恢复的可持续性。

**关键词:** 黄土高原; 植被恢复; 相似降水条件; 植被指数; 土壤水分指数; 遥感

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0179-07

## Relationships Between Vegetation Restoration and Soil Moisture on the Loess Plateau

WANG Lei<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1,2</sup>, LI Pengfei<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** On the Loess Plateau, soil moisture is one of the major factors impacting the sustainability of vegetation restoration. In this study, we used datasets on precipitation, vegetation cover and soil moisture content to investigate the changing trends and regional variabilities of vegetation cover and soil moisture across the Loess Plateau between 1992 and 2013 at a 25 km scale. The results showed that: (1) vegetation cover for most areas of the Loess Plateau experienced a significant increasing trend, while soil moisture for majority parts of the plateau underwent an insignificant change; (2) under the similar precipitation condition, there were mainly two types of vegetation cover-soil moisture changes, which were increased vegetation coverage and soil moisture and increased vegetation coverage and decreased soil moisture. Regional variabilities of changes in vegetation cover and soil moisture were large, further studies were desirable to understand the relationship between vegetation restoration and soil moisture changes, and therefore to improve the sustainability of vegetation restoration on the Loess Plateau.

**Keywords:** Loess Plateau; vegetation restoration; similar precipitation condition; NDVI; SWI; remote sensing

土壤水、大气水和地表水转化以及植被水分相互作用, 是地表过程研究的核心问题之一, 也是认识地表植被格局演变及其可持续性的基础<sup>[1-2]</sup>。黄土高原气候干

旱且地下水埋藏较深, 土壤水分是植被生长的直接保障。近年来, 由于退耕还林(草)项目的实施, 黄土高原植被覆盖快速增加, 并对土壤水分补给和数量等特征产

收稿日期: 2017-01-05

修回日期: 2017-01-19

资助项目: 中国科学院西部之光人才培养计划联合学者项目“黄土高原侵蚀坡地退耕还林草综合评价与可持续对策研究”(院[2013]165); 国家重点研发计划“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707); 科技基础性工作专项黄土高原生态系统与环境变化考察课题(2014FY210120)

第一作者: 王蕾钦(1989—), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 研究方向: 水土保持生态效益评价。E-mail: lei@nwfau.edu.cn

通信作者: 王飞(1971—), 男, 陕西户县人, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 水土保持环境效应评价与流域管理。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

生影响。一般而言,植被增加可以增加林冠截留,减少地表径流,增加土壤水分入渗<sup>[3]</sup>,但同时由于植被耗水增加会导致土壤干燥化<sup>[4-5]</sup>,从而制约植被生长,因此科学认识植被恢复和土壤水分变化过程及其相互关系,可为目前生态治理的可持续性提供更多科学参考。同时,由于降水为黄土高原土壤水分的最主要来源,强烈影响着土壤水分的时空变化<sup>[6-10]</sup>,如果采用相似降水年组分析<sup>[11]</sup>,可以在认识土壤水分变化过程基础上,尽可能减少降水因素的影响,从而更客观认识植被—土壤水分关系。由于土壤水分具有明显空间分异性<sup>[12]</sup>,目前地块和小区等小尺度的观测结果难以有效反映区域和流域等较大尺度的土壤水分变化,遥感技术反演的土壤水分可以反映综合下垫面特征,而且时效性强、覆盖范围大,可用于分析大尺度和长时段土壤水分和植被覆盖变化关系。为此,本文利用退耕还林前后的降水数据、遥感反演的植被覆盖数据以及土壤水分数据,分析了植被覆盖与土壤水分在研究时段内的变化趋势,探讨了各不同变化趋势组合中相似降水区域内植被变化对土壤水分的影响。

## 1 研究区、数据与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原地区东起太行山,西至日月山,南连秦岭,北抵阴山,跨山西省、陕西省北部、河南省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区及内蒙古等省区,面积约为64万km<sup>2</sup>。该区地处(暖)温带大陆性季风气候区的边缘,气候变化敏感,生态环境脆弱,水土流失严重。该区年降水量100~900mm,由东南向西北递减,多年平均年降水量约418mm。植被稀疏,草地占主导地位,占黄土高原地区总面积的41.75%<sup>[13]</sup>。地势西北高东南低,平均海拔1621m,地形复杂<sup>[14]</sup>,土壤以褐土与黄绵土为主<sup>[15]</sup>。自1998年起,该区陆续实施退耕还林(草)工程,重点改造易于产生水土流失的坡耕地,通过退耕、造林种草和人工封育等措施<sup>[16]</sup>,修复脆弱生态环境。自该工程实施以来,黄土高原的自然环境得到极大改善<sup>[17]</sup>,植被覆盖率自1999年的31.6%提高至2013年的59.6%<sup>[18]</sup>,有效减少了黄土高原的土壤侵蚀量和入黄泥沙量<sup>[19-22]</sup>。

### 1.2 数据

本研究数据主要包括降水、植被覆盖及土壤水分数据。降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网提供的1992—2013年黄土高原地区96个气象站点的降雨月值资料。植被数据包含GIMMSAVHRR(Global Inventory Modeling and Mapping Studies)和SPOTVGT(SPOT Vegetation)2种归一化植被指

数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)<sup>[23]</sup>。AVHRR-NDVI是每半个月(15d)合成的最大化NDVI数据,空间分辨率为8km,其下载自国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”,时间为1992年1月至1998年4月。SPOTVGT S10是由比利时弗莱芒技术研究所影像处理中发布的10日最大化合成数据,空间分辨率1km,时间为1998年4月至2013年12月。土壤水分数据为土壤湿度指数(Soil Water Index, SWI),采用欧洲资源卫星(European Remote Sensing Satellite, ERS)搭载的风散射计的遥感信息,通过变化检测方法,利用TU-Wien模型反演获取,SWI来自Essential Climate Variable Soil Moisture(ECV\_SM)数据集。该土壤水分数据代表的是0—1m土层的土壤水分饱和度,单位是%,空间分辨率为25km,时间分辨率是1d,本研究选取的时间范围是1992—2013年。其中,2001—2006年的土壤水分数据因卫星故障等原因缺测不可用。SWI在中国,尤其是黄土高原的适用性已经得到验证<sup>[24-27]</sup>。

### 1.3 方法

1.3.1 尺度一致化 由于分析数据的空间尺度(分辨率)不同,本研究进行了尺度一致化处理,将NDVI数据重采样至25km,其次利用普通克里金方法对月降雨数据插值,得到空间分辨率为25km的降雨格网数据,使NDVI与降水数据及SWI数据的空间分辨率一致,以更好分析区域尺度现象和过程。

1.3.2 NDVI与SWI的变化趋势及其组合 本文采用线性回归分析各像元NDVI与SWI年值在研究时段内的变化趋势。变化趋势以线性回归的斜率表示(式1)。2001—2006年土壤水分数据缺测,故其在趋势计算中不予考虑。

$$S = \frac{16 + \sum_{i=1}^{16} i \cdot P_i - \sum_{i=1}^{16} i \sum_{i=1}^{16} P_i}{16 \cdot \sum_{i=1}^{16} i^2 - (\sum_{i=1}^{16} i)^2} \quad (1)$$

式中: $i$ 代表年份, $i=1$ 时为1992年, $i=2$ 时为1993年, $i=10$ 时为2007年,以此类推, $i=16$ 为2013年; $p_i$ 为第 $i$ 年的NDVI或SWI值; $S$ 为趋势线的斜率,其绝对值表示NDVI或SWI的变化速率,绝对值越大表示变化速率越大。 $S$ 为正值表示降雨呈上升趋势,负值则为下降趋势。

对 $S$ 不为零的像元,采用 $F$ 检验确定变化的显著性。根据检验结果,变化趋势分为8个等级:极显著减少( $p < 0.01$ );显著减少( $0.01 \leq p < 0.05$ );较显著减少( $0.05 \leq p < 0.1$ );减少但不显著( $p \geq 0.1$ );增加但不显著( $p \geq 0.1$ );较显著增加( $0.05 \leq p < 0.1$ );

显著增加( $0.01 \leq p < 0.05$ );极显著增加( $p < 0.01$ )。

1.3.3 相似降水区域选取 相似降水条件包括降水量相似和降水过程相似的确定<sup>[11]</sup>。降水量相似依据年降水量差异确定。降水过程相似则通过分析降水量相似年组内逐月降水量的相关性确定。降水量相似选取时,相似年组之间须相隔一定年份,且降水量差异须在一定范围内。本研究中,降水相似区选择过程如下:选用年差 $\geq 5$  a;降水量相似采用“年降水总量 $\leq$ 研究格点对应年均降水量的 2%”为阈值;在年降水量相似的格点内,进一步选取月降水相关性显著性小于 0.05 的格点(相关系数 $>0.5529$ )。

1.3.4 NDVI 与 SWI 的交互分析 在完成黄土高原 NDVI 和 SWI 变化趋势组合后,判断各组合内符合相似降水条件的区域,分析各组合内相似降水区域中 NDVI 与 SWI 的特征。

2 结果与分析

2.1 NDVI 与 SWI 的时空分异特征及分区

2.1.1 NDVI 及 SWI 时空分布及变化 黄土高原

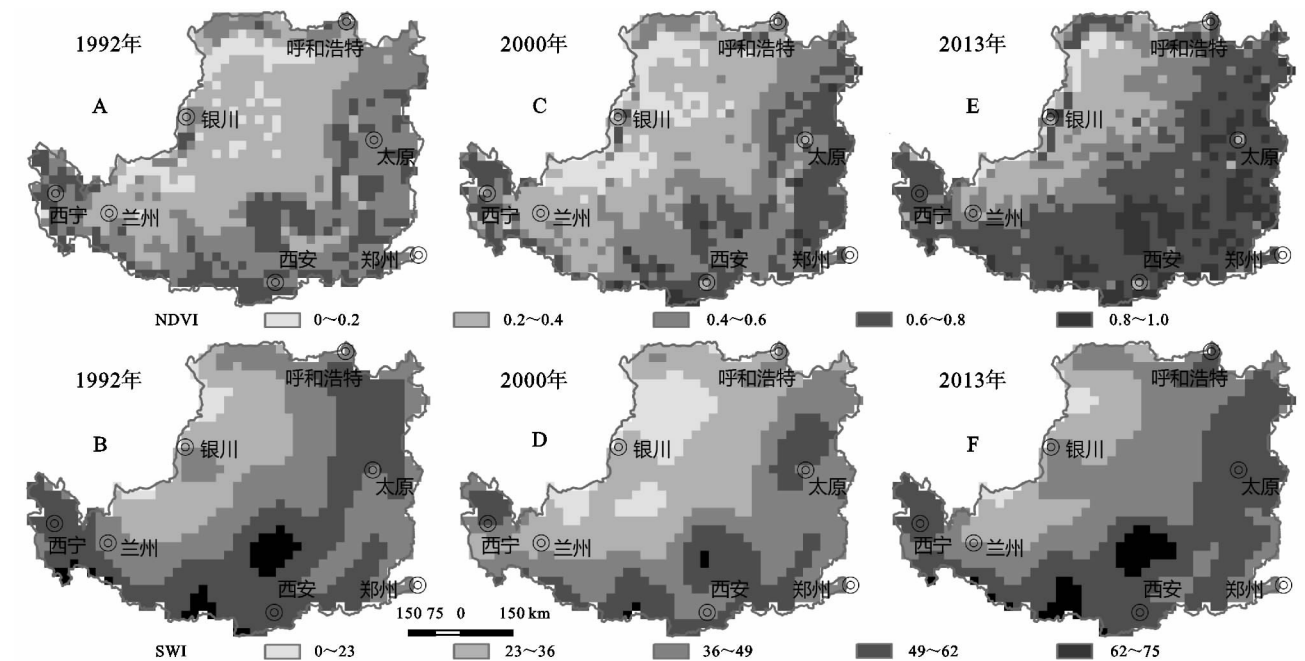


图 1 黄土高原 NDVI 及 SWI 的空间分布与变化特征

2.1.2 NDVI 与 SWI 变化趋势 NDVI 呈极显著增加的区域最大,占黄土高原总面积的 69.6%(表 1),分布于黄土高原大部分地区(图 3)。NDVI 较显著增加和显著增加的区域各占黄土高原总面积的 3.7%和 8.1%,主要位于黄土高原的西部银川周围以及兰州以北地区。NDVI 未发生显著增加或减少的区域占黄土高原总面积的 15%,主要集中于兰州以西。NDVI 极显著减少的区域位于西宁以东,呼和浩特以北的地区,占黄土高原总面积的 1.8%。ND-

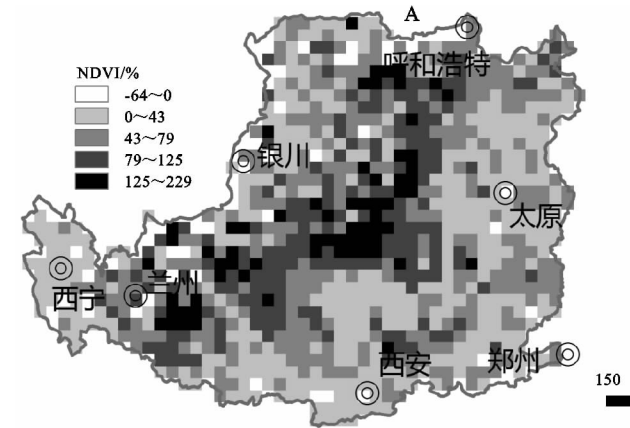
NDVI 由西北向东南递增(图 1A,C,E),且自 1992—2013 年,黄土高原 NDVI 值持续升高。相比 1992 年、2013 年 NDVI 平均增长了 53%(图 2A),增加的区域占黄土高原总面积的 94%,主要分布于黄土高原绝大部分地区,其中西安以北、银川以东部分地区最明显,可达 229%;同时,NDVI 在部分地区减少,主要分布在黄土高原西南部地区,减少幅度最高达到 63.5%。

SWI 的空间分布特征与 NDVI 相似,也由西北向东南升高(图 1B,D,F)。较 1992 年、2000 年黄土高原大部分地区的 SWI 降低,导致 SWI 均值也下降。2013 年黄土高原 SWI 均值高于 2000 年,且大部分地区的 SWI 上升。总体而言,1992—2013 年黄土高原 SWI 均值变化不大,仅 2.5%(图 2B)。增长的区域占黄土高原总面积的 65.5%,主要分布在黄土高原西北部分地区及东部的部分区域,其中银川以东及以南地区、郑州东部及太原东部增加明显,其中增加最多的区域可达 36.1%。SWI 下降的区域占黄土高原总面积的 27.2%,主要分布于兰州以西,西宁周围大部及西安以北。

VI 呈现较显著减少和显著减少趋势的区域占黄土高原总面积的 1.1%和 0.7%,主要位于兰州西北部。

研究时段内 SWI 未发生显著变化的区域占黄土高原总面积的 93.6%(表 1),其中非显著增加的区域占 62.27%,广泛分布于黄土高原南部与北部(图 3)。非显著下降的区域占 31.29%,主要位于黄土高原中部,即兰州以东、银川以北、西安以北及太原、郑州周围。SWI 极显著增加的区域仅占 0.8%,主要位于黄土高原西南部西宁附近。SWI 显著增加的区域分布

在 西 宁 附 近 与 黄 土 高 原 北 部 部 分 区 域, 占 黄 土 高 原 总 面 积 的 4%。 较 显 著 增 加 的 区 域 占 1.6%, 零 散 分 布



于 黄 土 高 原 中 部、 北 部 和 南 部。 研 究 时 段 内 不 存 在 SWI 极 显 著 减 少、 显 著 减 少 及 较 显 著 减 少 的 区 域。

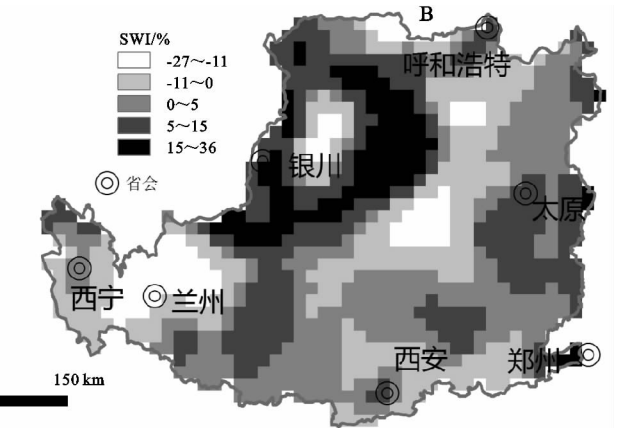


图 2 1992—2013 年间 NDVI 与 SWI 变化幅度

表 1 研究时段内 NDVI 与 SWI 的变化趋势及其面积

变化		NDVI		SWI	
		面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	占比/%	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	占比/%
增加	极显著	43.25	69.6	0.5	0.8
	显著	5	8.1	2.5	4
	较显著	2.31	3.7	1	1.6
	非显著	6.19	10	38.69	62.3
	非显著	1.13	5	19.44	31.3
减小	较显著	0.69	1.8	0	0
	显著	0.44	1.1	0	0
	极显著	3.13	0.7	0	0

表 1 和 图 3 的 中 的 NDVI 和 SWI 增 减 变 化 趋 势 空 间 组 合 共 有 30 个 类 型 (表 2), 其 中 面 积 超 过 黄 土 高 原 2% 的 类 型 有 9 个 ( $R_2, R_4, R_5, R_7, R_8, R_{11}, R_{15}, R_{16}$  及  $R_{29}$ )。  $R_4$  和  $R_5$  中 NDVI 极 显 著 增 加 的 面 积 较 大, 分 别 为 25.69, 15.13 万 km<sup>2</sup>, 占 黄 土 高 原 面 积 的 41.4% 和 24.3%, 其 中  $R_4$  主 要 分 布 在 黄 土 高 原 南 缘 和 北 部 的 丘 陵 区 与 风 沙 区,  $R_5$  主 要 分 布 在 中 部 丘 陵 区 和 晋 中 南 土 石 山 区 与 汾 河 谷 地。

2.2 相似降水选取

研 究 时 段 内, 共 有 76 个 年 组 存 在 相 似 降 雨 区 域

(表 3), 其 中, 1993—2009 年 组 中 满 足 相 似 降 雨 条 件 的 面 积 最 大, 占 黄 土 高 原 总 面 积 的 12.3%; 1997—2007 年 组 中 满 足 相 似 降 雨 条 件 的 面 积 最 小, 仅 有 0.25 万 km<sup>2</sup>, 占 黄 土 高 原 总 面 积 的 0.4%。 将 不 同 年 组 按 照 年 差 5, 6, 7, …, 21 a 分 类, 其 中 年 差 为 21 a 的 年 组 最 少, 只 有 1992—2013 年 一 组; 年 差 为 13, 14, 15 a 时, 组 数 最 多, 为 7 组。

2.3 相似降水条件下植被—土壤水分的关系

各 年 组 相 似 降 水 区 域 NDVI 与 SWI 基 本 特 征 值 (最 大 值、 最 小 值、 平 均 值) 统 计 见 表 3。 相 似 降 雨 条 件 下 NDVI 与 SWI 的 变 化 主 要 包 括 NDVI 与 SWI 同 时 增 加 及 NDVI 增 加 SWI 减 少 两 种 情 况。 在  $R_2, R_8, R_{11}, R_{15}$  4 个 区 域 中, NDVI 与 SWI 同 时 增 加。  $R_2$  主 要 位 于 西 宁 周 边 地 区 与 黄 土 高 原 西 北 部 地 区, 其 中 NDVI 与 SWI 同 时 增 加 的 点 数 占 各 年 组 内 满 足 相 似 降 雨 条 件 总 点 数 的 88.3%。  $R_8$  主 要 分 布 于 兰 州 东 部 与 北 部、 银 川 北 部、 太 原 西 部 与 南 部 地 区, 在  $R_8$  中 NDVI 与 SWI 一 并 增 长 的 点 数 占 总 点 数 的 47.9%。  $R_{11}$  和  $R_{15}$  相 对 集 中 于 银 川 与 兰 州 周 边 地 区, NDVI 与 SWI 同 时 增 长 的 点 数 分 别 占 总 点 数 的 42.7% 和 34.6%。

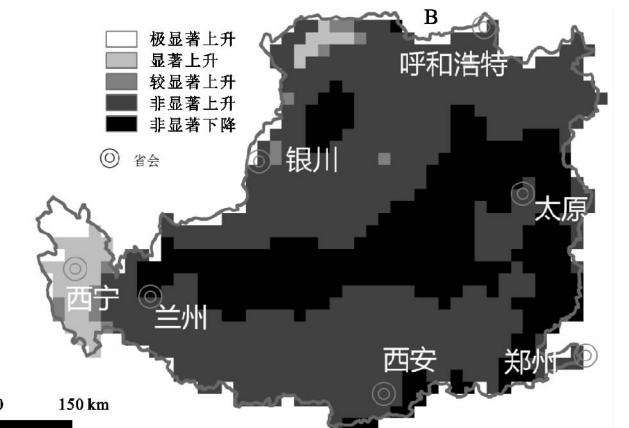
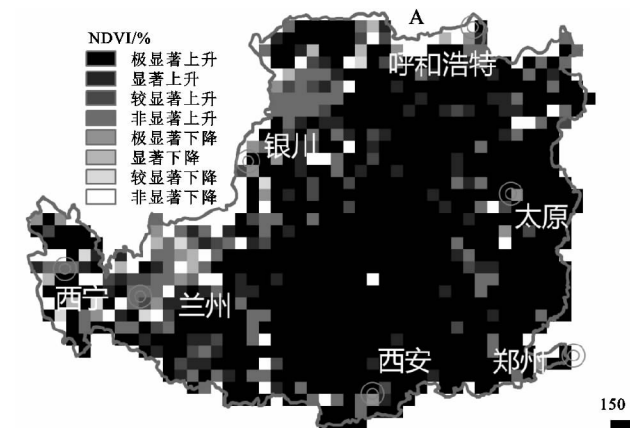


图 3 研究时段内 NDVI(A)和 SWI(B)变化趋势的空间分布

表 2 NDVI 和 SWI 变化趋势组合结果

组合	NDVI 变化	SWI 变化	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	组合	NDVI 变化	SWI 变化	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%
R <sub>1</sub>	+++	+++	0.25	0.4	R <sub>16</sub>	0+	0-	1.69	2.7
R <sub>2</sub>	+++	++	1.56	2.5	R <sub>17</sub>	---	+++	0.13	0.2
R <sub>3</sub>	+++	+	0.63	1	R <sub>18</sub>	---	0+	0.88	1.4
R <sub>4</sub>	+++	0+	25.69	41.4	R <sub>19</sub>	---	0-	0.13	0.2
R <sub>5</sub>	+++	0-	15.13	24.3	R <sub>20</sub>	--	++	0.13	0.2
R <sub>6</sub>	++	++	0.25	0.4	R <sub>21</sub>	--	+	0.06	0.1
R <sub>7</sub>	++	0+	3.31	5.3	R <sub>22</sub>	--	0+	0.31	0.5
R <sub>8</sub>	++	0-	1.44	2.3	R <sub>23</sub>	--	0-	0.19	0.3
R <sub>9</sub>	+	+++	0.06	0.1	R <sub>24</sub>	-	++	0.13	0.2
R <sub>10</sub>	+	+	0.06	0.1	R <sub>25</sub>	-	0+	0.31	0.5
R <sub>11</sub>	+	0+	1.69	2.7	R <sub>26</sub>	0-	+++	0.06	0.1
R <sub>12</sub>	+	0-	0.5	0.8	R <sub>27</sub>	0-	++	0.19	0.3
R <sub>13</sub>	0+	++	0.25	0.4	R <sub>28</sub>	0-	+	0.06	0.1
R <sub>14</sub>	0+	+	0.19	0.3	R <sub>29</sub>	0-	0+	2.38	3.8
R <sub>15</sub>	0+	0+	4.06	6.5	R <sub>30</sub>	0-	0-	0.44	0.7

注:极显著上升:+++;极显著下降:---;显著上升:++;显著下降:--;较显著上升:+;较显著下降:-;非显著上升:0+;非显著下降:0-。

表 3 NDVI 与 SWI 趋势组合下相似降水选取结果及相似降水区域内 NDVI 与 SWI 的基本特征

年差	年 1	年 2	面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	差值 NDVI	SWI	年差	年 1	年 2	面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	差值 NDVI	SWI
5	1992	1997	0.56	0.06	-0.12	13	1998	2011	1.63	0.22	0.04
	1993	1998	3.25	0.05	-0.05		1999	2012	5.38	0.18	0.01
	1994	1999	4.25	-0.01	0.04		2000	2013	1.94	0.20	0.13
	1995	2000	2.81	0.08	-0.03	14	1993	2007	3.19	0.14	0.00
	2007	2012	3.63	0.11	0.05		1994	2008	4.88	0.21	-0.04
6	2008	2013	1.31	0.14	0.13		1995	2009	3.00	0.23	0.06
	1992	1998	6.25	0.17	-0.06		1996	2010	4.25	0.22	0.04
	1993	1999	2.75	-0.06	0.00		1997	2011	1.88	0.08	0.18
7	1994	2000	4.88	-0.01	-0.09		1998	2012	3.13	0.23	0.16
	2007	2013	2.56	0.22	0.10	15	1999	2013	1.94	0.38	0.13
	1992	1999	0.81	0.68	0.03		1992	2007	6.69	0.31	-0.05
	1993	2000	3.75	0.02	-0.06		1993	2008	2.13	0.18	-0.04
8	2000	2007	1.50	0.14	0.08		1994	2009	2.00	0.19	-0.04
	1992	2000	1.00	0.06	-0.04		1995	2010	4.13	0.40	0.05
	1999	2007	1.06	0.12	-0.03		1996	2011	4.56	0.27	0.01
9	2000	2008	6.13	0.28	0.06		1997	2012	0.75	0.06	0.35
	1998	2007	2.31	0.17	0.00	16	1998	2013	2.75	0.41	0.09
	1999	2008	7.50	0.17	-0.07		1992	2008	5.88	0.36	-0.07
	2000	2009	2.44	0.18	0.08		1993	2009	7.63	0.24	-0.02
10	1997	2007	0.25	0.52	0.12		1994	2010	2.19	0.19	-0.04
	1998	2008	1.25	0.24	0.01		1995	2011	2.13	0.31	0.15
	1999	2009	3.06	0.15	0.02		1996	2012	3.25	0.29	-0.02
	2000	2010	4.19	0.26	0.02	17	1997	2013	1.19	0.34	0.27
11	1996	2007	4.50	0.29	-0.04		1992	2009	3.94	0.45	-0.05
	1997	2008	2.00	0.30	0.16		1993	2010	4.63	0.32	-0.01
	1998	2009	2.63	0.17	-0.05		1994	2011	3.44	0.12	0.00
	1999	2010	1.38	0.15	0.00		1995	2012	2.69	0.31	0.16
	2000	2011	3.50	0.17	0.08	18	1996	2013	2.81	0.38	0.10
12	1995	2007	3.00	0.31	0.01		1992	2010	5.06	0.34	-0.03
	1996	2008	2.63	0.30	0.02		1993	2011	2.63	0.25	0.01
	1997	2009	4.25	0.20	0.17		1994	2012	4.69	0.19	0.03
	1998	2010	3.13	0.19	-0.05		1995	2013	1.81	0.52	0.13
	1999	2011	1.69	0.12	0.05	19	1992	2011	1.38	0.39	0.05
13	2000	2012	2.44	0.27	0.16		1993	2012	3.25	0.15	0.03
	1994	2007	4.31	0.21	-0.08		1994	2013	2.00	0.29	0.06
	1995	2008	5.38	0.33	0.08	20	1992	2012	5.38	0.35	-0.01
	1996	2009	3.38	0.28	-0.02		1993	2013	3.00	0.37	0.15
	1997	2010	0.50	0.37	0.19	21	1992	2013	1.56	0.44	0.01

NDVI 增加而 SWI 减少的情况主要出现在  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_7$  和  $R_{16}$  内。 $R_5$  主要集中在西安以北及太原与郑州附近,其中 NDVI 增加 SWI 减少的点数占各年组内满足相似降雨条件总点数的比例最高,为 61%。 $R_4$  主要分布于银川以东、呼和浩特以南及西安周边地区,在  $R_4$  中 NDVI 增加 SWI 减少的点数所占比例为 51.8%; $R_7$  分布较为分散,主要在黄土高原中部和北部地区,NDVI 增加 SWI 减少的点数占总点数的 42.5%; $R_{16}$  主要位于兰州以东和银川东北部区域,其中 NDVI 增加 SWI 减少的点数占总点数的 37.6%。

研究时段内黄土高原也存在 NDVI 下降的区域。如, $R_{29}$  中 NDVI 减少的点数占总点数的 61.9%,其中 SWI 增加的部分占 28.3%,SWI 减少的部分占 33.6%。其他组合区域也会出现少量 NDVI 减少的情况(表 3)。

### 3 讨论

在研究时段内,黄土高原土壤水分呈现出先降低后增加的态势,2000 年土壤水分含量低于 1992 年,也低于 2013 年其主要原因是该区植被覆盖生长年限对土壤水有重要影响。例如,在黄土高原退耕还林中大量种植的刺槐,随着其生长年限的增加,剖面土壤水分变化存在拐点(15 a),在刺槐生长的前 15 a,其所在地区的土壤水状况恶化,而在拐点以后,土壤水分会恢复。不同植被类型下,土壤水分拐点出现的时间不同<sup>[4]</sup>。

作为陆地水循环的重要组成部分,土壤水分受气候、植被、地形及土壤理化性质等影响,使黄土高原植被恢复与土壤水分的关系呈现出复杂的态势。即,NDVI 与 SWI 同时增加、NDVI 增加 SWI 减少、NDVI 减少 SWI 增加、NDVI 与 SWI 同时减少 4 种情况(表 3)。其具体原因分析如下:导致 NDVI 与 SWI 同时增加的原因主要有以下三点:首先,NDVI 与 SWI 同时增加的地区,主要位于未进行大面积退耕还林的青海省、河套平原及关中平原等地(图 3)。这些地区的植被建设主要以自然恢复为主。植被建设既能增加降水下渗以补充土壤水分,也可加大植被蒸腾,土壤水分的上升或下降关键在于两者的平衡<sup>[28]</sup>。而天然林相比人工林,能更好的保持这种平衡,起到涵养土壤水源的作用。同时,已有研究表明,黄土区天然植被在生长良好时所在地区的土壤水要明显高于人工林<sup>[29]</sup>。其次,关中平原及河套平原有大量农田,这些地区 NDVI 与 SWI 同时增加也可能因为农牧业灌溉,其在一定程度上补给土壤水分<sup>[30]</sup>。再次,土地复垦措施也与土壤水分增加有一定关系。黄土高原煤矿资源丰富,长期开采破坏原生生态环境,引起严重

的水土流失<sup>[31]</sup>。九十年代初期这些矿区开始土地复垦,改善土壤结构与质量以保持水土。虽然土地复垦后植被覆盖上升不可避免地消耗土壤水分,但上述因素共同作用使土壤水分条件改善<sup>[27]</sup>。

NDVI 增加而 SWI 减少出现的原因可能如下:土壤水资源具有非地带性分异,即在相似的土壤水资源带中,坡度等地形因素也会导致土壤水分的局地分异。穆兴民<sup>[2]</sup>研究表明,由于降雨的再分配及不同坡位的大气蒸发力作用,与坡底相比,坡面较具有较低的土壤水分含量,因此坡面土壤更趋干旱。加之,黄土高原的退耕还林主要集中于坡耕地上,且已处于饱和状态<sup>[32]</sup>。大规模的退耕还林草中所种植植被不仅快速消耗土壤水分,而且耗水量常高于当地降水量<sup>[4,5]</sup>,进一步加剧坡面土壤干旱。在黄土高原已有研究发现植被覆盖对土壤水分的减少作用。例如,王云强<sup>[4]</sup>发现在黄土高原,降水量无明显变化时植被覆盖增加会减少表层土壤水分。穆兴民<sup>[29]</sup>等认为土壤干层是目前区域人工植被生态系统不稳定性的体现,黄土高原营造的人工林尚不能达到涵养水源的功能。若退耕还林草面积继续扩大,加之已种植植被的生长,土壤水分需求量不断上升,将导致黄土高原土壤水分亏缺越来越严重,进而影响植被生长发育<sup>[33-34]</sup>。此外,也有研究发现<sup>[35]</sup>,黄土高原近几十年来,气温呈上升趋势,其中在退耕还林集中区域,如陕北、宁夏东南部及甘肃东部等地区,气温上升尤为明显。气温升高会加剧土壤水分蒸发,导致土壤干燥化。然而,尚未有研究讨论退耕还林与气候变暖对土壤干燥化贡献程度。

研究时段内,由于退耕还林工程的实施黄土高原绝大部分地区的植被得到恢复,但也存在一些地区植被覆盖下降的情况。但总体来讲,NDVI 减少的区域占比较少且分布较为零散,不具有区域特征,现有资料不能很好地解释这些变化原因,有待继续搜集资料后做进一步研究。

利用遥感方法研究黄土高原植被恢复对土壤水分影响已有先例<sup>[13,27]</sup>。然而,这些研究并未剔除降雨的影响,导致其对植被覆盖变化和土壤水分特征之间关系的描述具有较大不确定性。本研究首次在植被恢复与土壤水关系研究中引入相似降水概念,排除降水的影响,提高了研究结果的可靠性,是对已有研究的进一步深化。

黄土高原土壤质地较为均一,以黄绵土为主(面积占比为 31.72%),但也存在其他类型土壤,如褐土、红黏土、风沙土等<sup>[36]</sup>。土壤质地差异影响着土壤水分的空间分布。如,研究表明田间持水量随着土壤

容重的增加而增加<sup>[37]</sup>。本文未考虑土壤质地对土壤水分空间分布的影响。另外,本文未考虑地形因素(如坡度、坡向等)对土壤水分分布的影响。因此,未来研究需考虑更多影响因子以便进一步理清植被恢复对土壤水分的影响。此外,由于2001—2006年土壤水分数据缺测,其在趋势性分析中未予考虑,这难免影响研究结果的精度。因此,后续研究可进一步拓展数据源、完善数据序列,以便更加全面评估黄土高原植被恢复对土壤水分的影响。

## 4 结论

本文利用退耕还林前后的降水数据与遥感反演的植被覆盖数据及土壤水分数据,分析了植被覆盖与土壤水分在研究时段内相似降水条件下的变化趋势。结果表明研究时段内黄土高原大部分地区植被覆盖呈极显著增加趋势,而绝大部分的土壤水分未发生显著变化。相似降水区域植被覆盖与土壤水分变化主要变现为植被覆盖与土壤水分同时增加及植被覆盖增加土壤水分减少两种情况,且土壤水分减少的区域分布广泛。黄土高原植被、土壤水分变化的区域性明显,在未来生态恢复过程中,需要进一步认识植被恢复对土壤水分的关系,促进黄土高原植被恢复的可持续性。

### 参考文献:

- [1] 李玉山. 黄土区土壤水资源循环特征及其对陆地水文循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.
- [2] 穆兴民. 试论黄土高原土壤水资源的地带性与非地带性[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 237-244.
- [3] 杨朝瀚. 黄土丘陵沟壑区几种主要水土保持型植被水分生态特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [4] 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [5] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 71-81.
- [6] 徐学选, 刘文兆, 高鹏, 等. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 52-55.
- [7] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 极端降水条件对林地水分循环的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 83-87, 92.
- [8] 李锋瑞, 赵松岭. 陇东黄土旱塬不同降水年型作物土壤水分时空分异特征分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(2): 99-107.
- [9] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 晋西北人工林土壤水分特点与降水关系研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 60-65.
- [10] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of

Hydrology, 2001, 240: 243-263.

- [11] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 相似性降水条件下北洛河水沙变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 36-40.
- [12] D'urso G, Minacapilli M. A semi-empirical approach for surface soil water content estimation from radar data without a-priori information on surface roughness [J]. Journal of Hydrology, 2006, 321(1): 297-310.
- [13] 焦俏, 王飞, 李锐, 等. ERS 卫星反演数据在黄土高原近地表土壤水分中的应用研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1388-1397.
- [14] 樊廷录. 黄土高原旱作地区径流农业的研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [15] 王力. 陕北黄土高原土壤水分亏缺状况与林木生长关系[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [16] 高海清. 陕北地区退耕还林(草)可持续发展支撑体系研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [17] Mu L, Liang Y, Han R. Assessment of the soil organic carbon sink in a project for the conversion of farmland to forestland: A case study in Zichang County, Shaanxi, China [J]. PLoS ONE, 2014, 9(4): e94770.
- [18] Chen Y, Wang K, Lin Y, et al. Balancing green and grain trade [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 1-3.
- [19] 王娟, 卓静. 基于 RS 和 GIS 的陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 220-223.
- [20] 栾勇. 退耕还林对黄土高原小流域土壤侵蚀控制效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [21] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [22] 陈浩, 梁广林, 周金星, 等. 黄河中游植被恢复对流域侵蚀产沙的影响与治理前景[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005(5): 452-463.
- [23] Zribi M, Pardé M, De Rosnay P, et al. ERS scatterometer surface soil moisture analysis of two sites in the south and north of the Sahel region of West Africa [J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(1): 253-261.
- [24] Scipal K. Global soil moisture retrieval from ERS scatterometer data [D]. Austria: Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, 2002.
- [25] Zhao D, Kuenzer C, Fu C, et al. Evaluation of the ERS scatterometer-derived soil water index to monitor water availability and precipitation distribution at three different scales in China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(3): 549-562.
- [26] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 土壤湿度指数在黄土高原的适宜性评价[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 31-36.

今后应根据区域特点,采取针对性措施,提高区域农用地资源禀赋度:(1)关中地区应该尽量避免盲目追求土地效益造成的掠夺式开发,落实国家政策,严格划定城市边界,积极建设高标准基本农田,确保耕地总量和质量达到动态平衡。(2)陕北地区应该着重采取保护、治理与利用相结合的方式,发挥农用地数量优势,进一步提高农地利用效益,建立可持续发展的土地、人口、环境组合运作模式。(3)陕南地区应该适度加大开发农用地的力度与深度,挖掘农用地潜力的同时调整农用地利用结构,优化资源配置,提高农地利用效益。

#### 参考文献:

- [1] Ohlin, Inter-regional and International Trade[M]. Cambridge, MA:Harvard University Press, 1933.
- [2] 曹冯. 环长株潭城市群土地资源禀赋与经济发展传导机制研究[D]. 福州:福建师范大学,2015.
- [3] 皮啸菲,周生路,吴绍华. 江苏省土地资源禀赋度空间变化研究[J]. 土壤,2010,42(4):652-657.
- [4] 唐亚平. 陕西省土地利用变化的区域差异及成因分析[J]. 水土保持通报,2013,33(3):301-305.
- [5] 宣勇,范一大,王兴玲,等. 西部荒漠典型区 LUCC 及景观格局时空变化驱动机制研究:以尉犁县为例[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):188-195.
- [6] 易凤佳,李仁东,常变蓉. 基于面向对象的长株潭地区遥感影像分类方法[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2014,48(6):910-916.
- [7] 薄广涛,牛志君,郭义强,等. 冀西北间山盆地土地利用变化地形梯度效应分析[J]. 水土保持研究,2017,24(1):1-6.
- [8] 庄逐舟,黄秋昊,石云. 黄土丘陵区土地利用变化与地形梯度关系研究[J]. 水土保持研究,2016,23(4):331-337.
- [9] 吴金华,李纪伟,梁晶晶. 土地利用程度与效益关系研究:以延安市为例[J]. 中国土地科学,2011,25(8):54-60.
- [10] 吴滢滢,吴绍华,周生路,等. 昆山市土地生态质量空间分异及其对土地利用程度的响应[J]. 水土保持研究,2015,22(4):201-205,209.
- [11] 郭旭东,邱扬,连纲,等. 基于 PSR 框架的土地质量指标体系研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2003,22(5):479-489.
- [12] 胡赛,蒲春玲,汪霖,等. 基于熵值法的乌什县农用地利用效益评价研究[J]. 中国农业资源与区划,2016,37(3):111-115,142.
- [13] 武美丽,敖登高娃,赵明. 基于主成分分析法的农用地集约利用评价:以内蒙古鄂尔多斯市为例[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(9):97-103.
- [14] 黄正良,钟慧润. 西安市土地利用空间分异研究[J]. 地域研究与开发,2011,30(4):108-111.
- [15] 陈娟,南灵. 陕西省农地非农化生态系统服务价值损失评价[J]. 西南农业学报,2013,26(1):259-263.
- [16] 杨荣金,傅伯杰,刘国华,等. 黄土丘陵沟壑区生态环境建设中的水问题:以延河流域为例[J]. 环境科学,2004,25:37-42.
- [17] 穆兴民. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报,2003,40(2):210-217.
- [18] 马长炯,马宁,史世斌. 内蒙古后套绿洲水资源合理利用[J]. 干旱区资源与环境,1995,9(3):113-121.
- [19] 李鹏飞. 植被恢复对黑岱沟煤矿排土场土壤性质和质量的影响研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [20] 陈怡平,骆世明,李凤民,等. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J]. 地球环境学报,2015,6(5):265-269.
- [21] Liu Q, Yang Z, Cui B. Spatial and temporal variability of annual precipitation during 1961—2006 in Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(3):330-338.
- [22] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报,2001,16(5):433-438.
- [23] 李振朝. 近 50 年黄土高原气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(3):57-62.
- [24] 付东磊,刘梦云,刘林,等. 黄土高原不同土壤类型有机碳密度与储量特征[J]. 干旱区研究,2014,31(1):44-50.
- [25] 李玉山,韩仕峰,汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985(2):1-17.

(上接第 185 页)