

# 盐池县荒漠草原人工植被重建对区域生态系统蒸散的影响

丹杨<sup>1,2</sup>, 杜灵通<sup>1,2</sup>, 王乐<sup>1,2</sup>, 马龙龙<sup>1,2</sup>, 孟晨<sup>1,2</sup>, 倪细炉<sup>1,2</sup>

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** [目的] 研究荒漠草原人工植被重建对区域蒸散的潜在影响, 旨在为区域生态恢复重建提供理论依据。[方法] 基于 2001—2018 年 MODIS ET 和 NDVI 产品, 利用趋势分析、相关分析和分区统计等方法, 以宁夏回族自治区盐池县为例, 研究了荒漠草原人工植被重建对区域生态系统蒸散的影响。[结果] ①2001—2018 年盐池县 NDVI 整体呈上升趋势, 增长幅度为 0.006 0/a, 98.55% 的区域显著上升。②2001—2018 年均蒸散量(ET)为 266.73 mm, 空间上表现为西南高于西北的特征, 近 18 a 盐池县蒸散量显著上升( $p < 0.01$ ), 增长幅度为 6.27 mm/a, 全县区域内 ET 均达到了显著上升趋势。③盐池县大面积人工植被重建后, ET 显著升高, ET 与 NDVI 呈显著正相关。ET 与 NDVI 的变化趋势相关性为 0.76 ( $p < 0.01$ )。④在盐池荒漠草原地区, 人工植被重建造成的植被结构变化导致生态系统蒸散量更大, 消耗更多的水分, 同时也使 ET 增长速率加快。[结论] 盐池荒漠草原人工植被重建提高了区域 NDVI 值, 也增强了生态系统的 ET, 水分消耗的加剧将影响生态系统的稳定性。

**关键词:** 荒漠草原; 人工灌丛; 植被变化; 蒸散

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)05-0008-08

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>3, P333.1

**文献参数:** 丹杨, 杜灵通, 王乐, 等. 盐池县荒漠草原人工植被重建对区域生态系统蒸散的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 8-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.002; Dan Yang, Du Lingtong, Wang Le, et al. Effects of artificial vegetation reconstruction on regional ecosystem evapotranspiration in desert steppe of Yanchi County[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 8-15.

## Effects of Artificial Vegetation Reconstruction on Regional Ecosystem Evapotranspiration in Desert Steppe of Yanchi County

Dan Yang<sup>1,2</sup>, Du Lingtong<sup>1,2</sup>, Wang Le<sup>1,2</sup>, Ma Longlong<sup>1,2</sup>, Meng Chen<sup>1,2</sup>, Ni Xilu<sup>1,2</sup>

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest

China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** [Objective] The potential impacts of artificial vegetation reconstruction of desert steppe on regional evapotranspiration were studied in order to provide a theoretical basis for regional ecological restoration and reconstruction. [Methods] Based on the MODIS ET and NDVI products from 2001 to 2018, trend analysis, correlation analysis, and zoning statistics were used to study the effects of artificial vegetation reconstruction on regional ecosystem evapotranspiration, with the desert steppe in Yanchi County of Ningxia Hui Autonomous Region being used as an example ecosystem. [Results] ① The NDVI value in Yanchi County showed an upward trend from 2001 to 2018, with the growth rate reaching 0.006 0/a, and the growth area of the desert steppe in Yanchi County reached 98.55%. ② In 2001—2018, the average evapotranspiration (ET) was

收稿日期: 2019-06-10

修回日期: 2019-07-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“荒漠草原多时空尺度蒸散演变特征及驱动机制研究: 以宁夏盐池县为例”(41661003); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(XAB2017AW01); 宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06); 宁夏大学研究生创新项目(GIP2019044)

第一作者: 丹杨(1995—), 女(回族), 山西省晋城市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统水循环研究。E-mail: dany31@qq.com.

通讯作者: 杜灵通(1980—), 男(汉族), 宁夏同心县人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事生态遥感及碳水循环研究。E-mail: dult80@qq.com.

266.73 mm, which showed that the ET in the southwest was higher than that in the northwest. The evapotranspiration in Yanchi County increased significantly over the past 18 years ( $p < 0.01$ ), with a growth rate of 6.27 mm/a. The ET has a noticeable upward trend in all pixels of Yanchi County. ③ The ET increased notably after large-scale artificial vegetation reconstruction in Yanchi County, and the ET and NDVI showed a significant positive correlation. The correlation between the changes in the ET and NDVI was 0.76 ( $p < 0.01$ ). ④ Vegetation structure change caused by vegetation reconstruction leads to greater evapotranspiration of the ecosystem, more water consumed in the desert steppe area of Yanchi County, and an accelerated growth rate of the ET. [Conclusion] The artificial vegetation reconstruction of the desert steppe has increased the NDVI value and enhanced the ET of the regional ecosystem in Yanchi County. The increased water consumption will affect the stability of the desert steppe ecosystem.

**Keywords:** desert steppe; artificial shrub; vegetation transition; evapotranspiration

荒漠草原是干旱、半干旱地区的一种特殊草原植被类型,其植被往往具有明显的过渡性特征,中国北方草原由于长期的过度放牧和开垦,发生了不同程度的退化<sup>[1]</sup>,其中宁夏回族自治区盐池县的荒漠草原在 20 世纪 70 到 80 年代经历了较为严重的退化过程。随后,盐池县实施了一系列防沙治沙生态治理工程,特别是 2000 年来大面积实施的退耕还林工程和禁牧政策,致力于抑制和逆转当地的沙漠化,已取得了明显成效<sup>[2]</sup>。其中,大面积采用“人工种植柠条+封育措施”的人工植被重建模式对退化荒漠草原进行治理,现已形成约  $8.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的以俗称柠条的中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)为优势种的荒漠草原灌丛景观<sup>[3]</sup>,其生态学过程和稳定性维持机理成为当前研究的热点。

蒸散(evapotranspiration, ET)由土壤蒸发与植物蒸腾组成,它既是陆地生态系统中土壤—植被—大气间水分消耗的主要途径<sup>[4]</sup>,也是生态系统水循环中最重要水文过程之一<sup>[5]</sup>,还是联系植物气孔行为、水分利用和碳循环的关键生态过程<sup>[6]</sup>。在干旱半干旱地区,蒸散是草地生态系统主要的水分消耗方式,也是控制生态系统结构的关键过程<sup>[7]</sup>,对维持生态系统的稳定性具有重要意义。荒漠草原人工生态治理导致的灌丛化过程,尽管与自然灌丛化的成因不同<sup>[8]</sup>,但其也改变了原有植被结构,理论上会对草地生态系统碳水循环过程产生影响<sup>[9-10]</sup>。植被结构的变化会影响植物蒸腾过程,进而引起生态系统蒸散变化,而这种变化规律目前尚没有定量的研究。目前已有研究多集中在植被特征<sup>[11-14]</sup>和蒸散变化趋势<sup>[15-17]</sup>等方面,从区域尺度上宏观研究人工植被重建对蒸散影响的报道较少。因此,本文采用覆盖盐池县的长时间序列卫星遥感监测数据,开展荒漠草原植被重建对区域生态系统蒸散的影响,以期于干旱半干旱地区荒漠草原的生态修复提供理论依据。

## 1 研究区概况、数据与方法

### 1.1 研究区概况

盐池县( $37^{\circ}04' - 38^{\circ}10' \text{ N}$ ,  $106^{\circ}30' - 107^{\circ}47' \text{ E}$ )位于宁夏回族自治区东部,面积  $6\,769 \text{ km}^2$ 。盐池气象站观测的 1958—2017 年平均气温为  $8.34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量为  $296.99 \text{ mm}$ ,属于典型的温带大陆性气候。在地理单元上,盐池北接毛乌素沙漠,东南与黄土高原相连,属于黄土丘陵向鄂尔多斯台地的过渡地带,全县自东南向西北由干草原向荒漠草原过渡。土壤类型主要是灰钙土,其次是黑垆土和风沙土,其中南部黄土高原丘陵区以黑垆土为主,其次为灰钙土,北部鄂尔多斯缓坡丘陵区以风沙土、灰钙土为主。主要天然植物种有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、白草(*Pennisetum centrasianicum*)、赖草(*Leymus secalinus*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)等<sup>[18]</sup>。盐池近几十年在防沙治沙中,大面积人工种植柠条对荒漠草原自然植被干扰强烈,这样的人工植被重建模式也逆转了盐池县的土地沙漠化过程<sup>[19]</sup>。

### 1.2 数据来源及处理

1.2.1 数据来源 本研究所需要的数据主要包括中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的 ET、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)以及降水数据。其中,MODIS 数据来源于美国航空航天局网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。主要使用 MODIS 的陆地二级产品 MOD13A1 归一化植被指数数据集和四级产品 MOD16A2 蒸散数据集<sup>[20-21]</sup>。ET 数据空间分辨率为  $500 \text{ m}$ ,时间分辨率是  $8 \text{ d}$ ,2001—2018 年共计 828 景。NDVI 数据时间分辨率为  $16 \text{ d}$ ,空间分辨率为  $500 \text{ m}$ ,2001—2018 共 414 景。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的中国地面气候

资料日值数据集(V3.0),选取盐池站 2001—2018 年的日累积降水量数据。

1.2.2 数据处理方法 首先使用 MODIS Reprojection Tool 软件对 MODIS 遥感影像进行预处理,将正弦曲线投影转换为阿尔伯斯等积投影,并将 HDF 数据格式转化为 GeoTIFF 数据格式。再根据 MODIS 产品的数据说明,将填充值剔除后,采用 IDL 编程算法使用 2001—2018 年的同一期数据均值进行插补,之后使用 ArcGIS 软件插补缺少的 2 景影像并裁剪获得覆盖盐池县区域的空间数据。将获得的盐池县空间数据利用 Python 编程对影像进行批量处理计算,获得月时间尺度的数据,再采用最大值合成算法<sup>[22]</sup>和累加法分别计算年 NDVI 和年 ET。最后使用 ENVI 软件和 IDL 编程对 NDVI 和 ET 系列遥感图像进行像元统计分析和数值计算。

### 1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 为了定量的分析盐池县 ET 和 NDVI 的变化趋势,采用处理得到 2001—2018 年的年 NDVI 和年 ET 数据,使用最小二乘回归分析法,对植被和蒸散的变化进行回归模拟:

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: $k$ ——回归斜率; $n$ ——研究时段; $i$ ——时间变量, $i=1,2,\dots,n$ ;  $x_i$ ——第  $i$  年的样本值(NDVI 或 ET);当  $k>0$  说明样本数据处于增加趋势,反之则是减少趋势。结合数据变化趋势和  $F$  检验( $p=0.05$ ,  $p=0.01$ ),可得到极显著上升( $k>0$ ,  $p<0.01$ ),显著上升( $k>0$ ,  $0.01<p<0.05$ ),不显著上升( $k>0$ ,  $p>0.05$ ),不显著下降( $k<0$ ,  $p>0.05$ ),显著下降( $k<0$ ,  $0.01<p<0.05$ ),极显著下降( $k<0$ ,  $p<0.01$ )这 6 种变化趋势。

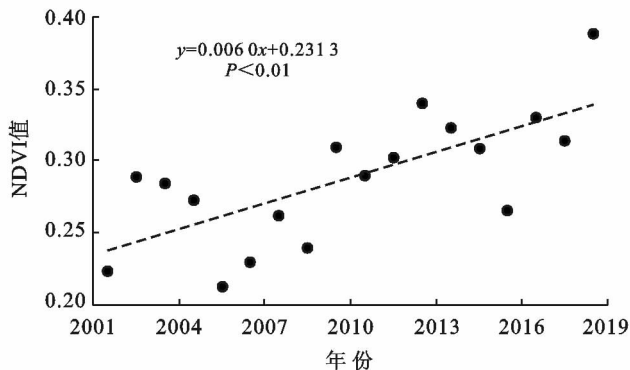


图 1 2001—2018 年盐池县 NDVI 的年际和平均年内变化特征

从 2001—2018 的 NDVI 均值空间分布来看(图 2),盐池东南部大水坑镇—麻黄山乡一带和东北部花

1.3.2 相关分析 利用 Pearson 相关分析法研究 NDVI 和 ET 的关系,定量评估植被变化与蒸散的关系,其计算公式如下:

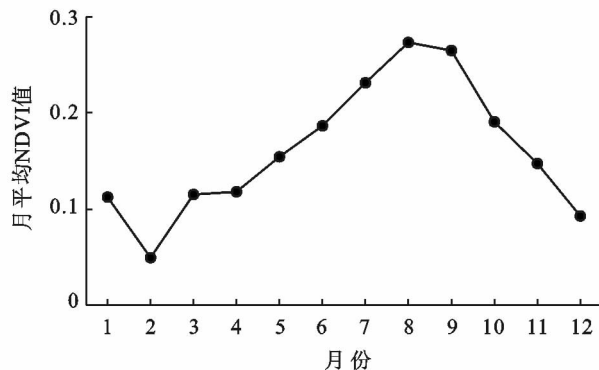
$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: $x_i$ ——第  $i$  年的 NDVI;  $y_i$ ——第  $i$  年的 ET;  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ——NDVI 和 ET 的多年均值;  $R_{xy}$ ——相关系数,当  $R_{xy}>0$  时表示正相关,当  $R_{xy}<0$  时表示负相关。Pearson 相关系数  $R_{xy}$  的绝对值越大,表示因变量与自变量的相关程度越高。

## 2 结果与分析

### 2.1 NDVI 变化特征

2001—2018 年盐池县年均 NDVI 为 0.288 0,其中最低的 2005 年为 0.213 0,最高的 2018 年为 0.388 7。年均 NDVI 整体较低,体现了盐池县的气候植被特点,盐池地处半干旱地区,植被类型以荒漠草原为主,植被覆盖度整体偏低、生产力偏弱。但近 18 a 的 NDVI 变化呈显著性上升趋势,年增长幅度为 0.006 0/a(见图 1),尽管在一些年份出现波动,但整体上升趋势特征很显著,对比历史同期的极端气候情况,可以发现波动低谷与宁夏经历的极端干旱事件<sup>[23]</sup>有关。从近 18 a 盐池县年内逐月 NDVI 的变化来看,年内 NDVI 表现出随植被生长季变化的单峰特征(图 1)。NDVI 在 2 月达到最低值,在 4 月植被进入生长季后,NDVI 表现出明显上升态势,在 8 月生长季达到最旺盛时,NDVI 也达到最高值 0.27。之后,随着秋冬季的来临,植被开始逐渐衰落,NDVI 开始下降。NDVI 的这种变化特征与盐池地区的主要植物生长节律一致。



马池镇的 NDVI 值相对较高。大水坑—麻黄山乡一带为黄土丘陵区,小气候相对湿润,植被本底较好;东

北部花马池镇发展有较大面积的灌溉农业,故植被相对丰茂。而盐池西部,特别是西北部为大面积的荒漠草原,其 NDVI 值偏低,只有一些以农业灌溉垦殖区和生态治理重点区为中心的斑块状区域 NDVI 稍高。从 NDVI 的空间变化趋势来看,呈上升趋势的区域面

积占盐池县域的 98.55%,其中 65.34%的区域达到了显著性上升( $p < 0.05$ ),42.07%的区域达到了极显著上升( $p < 0.01$ )。由此可见,近些年盐池县宏观的植被盖度、密度增长明显,生态治理工程在植被恢复方面取得了显著的成效。

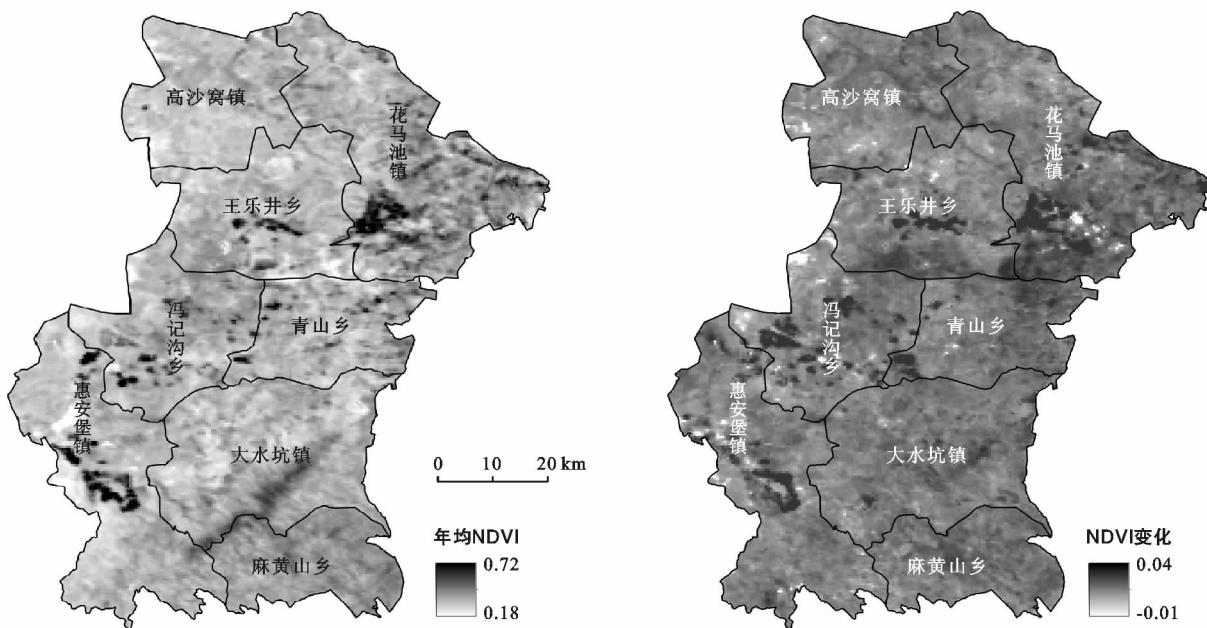


图 2 2001—2018 年盐池县 NDVI 均值和变化趋势

### 2.2 ET 变化特征

2001—2018 年盐池县年均 ET 为 266.73 mm,其最小值出现在 2001 年,为 204.31 mm,最大值出现在 2016 年,为 318.77 mm(见图 3)。大多数年份 ET 低于同期盐池县的降水量,只有在 2005,2006,2010 和 2013 等个别年份,生态系统 ET 高于同年降水量,可见盐池荒漠草原地区生态系统 ET 的水分来源主要为降水向土壤的补给,当在个别干旱年份,生态系统过多的需水会损耗到深层土壤水及浅层地下水。ET 年际间也呈波动增强趋势,增长幅度为 6.27 mm/a,增强趋势达到

了极显著。盐池荒漠草原的月均 ET 为 20.44 mm,低于月均降水量 5.73 mm。年内 ET 从年初开始逐渐降低,在 5 月达到最低值 12.78 mm 后,随着夏季降水的增加、太阳辐射的增强和植被快速生长期的到来,ET 开始上升,在 8 月达到 24.81 mm 的顶峰,之后,随着雨季和植物生长季的结束,ET 开始下降(图 3)。由于 ET 由土壤蒸发和植被蒸腾共同构成,其年内变化虽然在一定程度上受自然降水的影响,但荒漠草原的沙质土壤—植被系统对降水转化为 ET 有一定的滞后作用,故 ET 在全年的波动没有降水波动大。

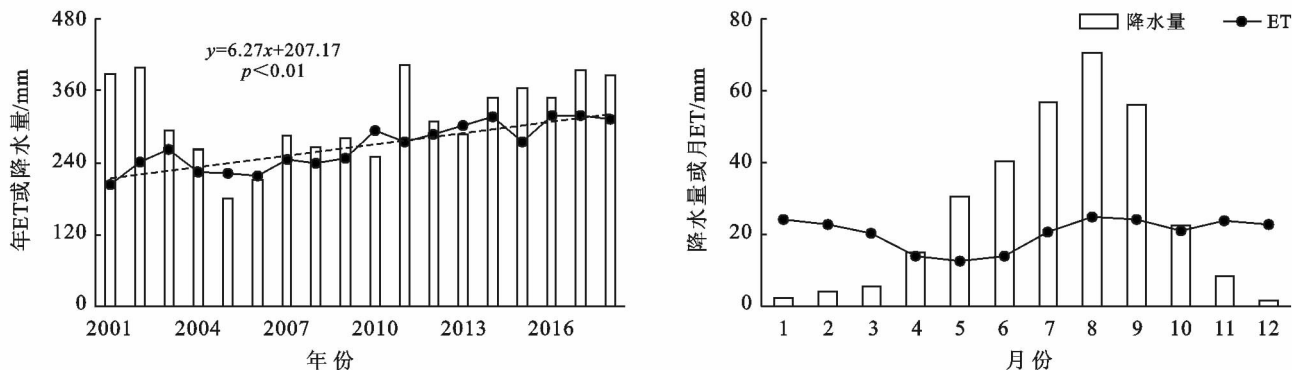


图 3 2001—2018 年盐池县 ET 的年际和年内变化特征

从 ET 的空间分布情况来看,表现出由西北向东南逐渐增高的特征(见图 4)。ET 的这种空间分布与地理、气候特征有关,盐池县从西北向东南由风沙区的荒漠草原向黄土区的典型草原过渡,降水量也由北向南逐渐增加。

除了 ET 在空间上随地理、气候变化的规律性特征外,盐池县在惠安堡镇—冯记沟乡—王乐井乡—花马池镇一线还分布着一些 ET 高于周边状态的斑块

状区域,这些斑块状高 ET 区为 20 世纪 90 年代建成的扬黄灌区和库井灌区,由灌溉农业导致的高蒸发和高蒸腾引起斑块状高 ET。ET 的年际间变化斜率显示,全县 ET 在 2001—2018 年间均呈上升趋势,进一步利用  $F$  检验( $p < 0.01$ )得出,盐池县的 ET 上升趋势达到了极显著。通过对比 ET 均值和变化趋势图得出,ET 平均值越高的区域,其近 18 a 的变化斜率也越高。

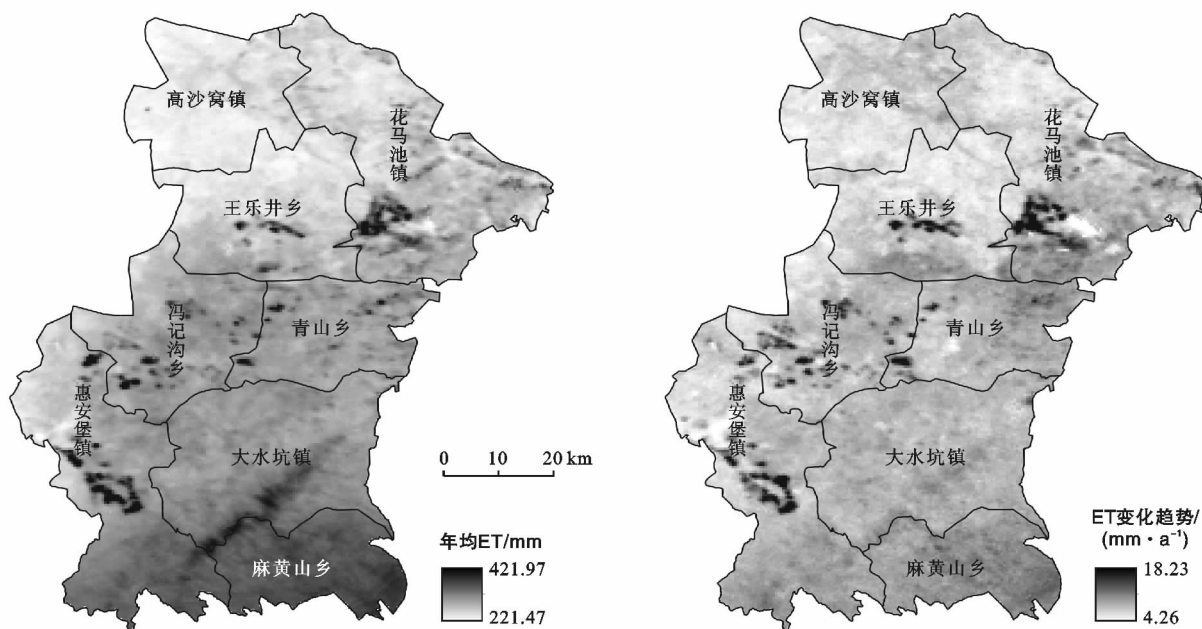


图 4 2001—2018 年盐池县 ET 均值和变化趋势

### 2.3 人工植被重建对区域生态系统蒸散的影响

已有研究表明,封育禁牧、灌区开发、退耕还林等人类活动促使盐池 NDVI 的显著增加<sup>[8]</sup>,故盐池县 NDVI 的变化一定程度上代表了人工植被重建的强弱。为定量探讨荒漠草原人工植被重建对生态系统蒸散的影响,利用 Pearson 相关分析法研究了近 18 a ET 与 NDVI 间的相关性。结果表明,近 18 a 盐池荒漠草原 ET 与 NDVI 存在极显著正相关关系( $R = 0.82, p < 0.01$ ),即在植被生长茂盛的年份,其生态系统的蒸散也更强(见图 5)。

由于年 NDVI 是由最大值合成算法获得,其代表的是一年中植被生长最好的状态,但不能说明植被生长全过程中 ET 与 NDVI 的关系。为此,本研究累加了盐池荒漠草原主要植物的生长季(4—9 月)的 ET,并分析其与生长季平均 NDVI 的关系。结果显示,植被生长季的 ET 与 NDVI 存在更强的相关性( $R = 0.89, p < 0.01$ ),即荒漠草原植被生长过程中,NDVI 越高的年份,植被生长越丰茂,生态系统蒸散也越强(图 5)。此外,从 2001—2018 年间生长季(4—9 月)

和非生长季(10 月至次年 3 月)的逐月 ET 与 NDVI 关系来看,在生长季二者存在极显著正相关关系( $R = 0.82, p < 0.01$ ),即随着植物生长越茂盛,NDVI 越高,ET 也越高,这与前文 NDVI 和 ET 的特征一致,如在 8 月 NDVI 达到年内最大,ET 也升到年内最高。而在非生长季二者不存在相关关系,即非生长季生态系统 ET 主要来自于蒸发,与植被生理生态活动的关系不大(图 5)。

此外,从 NDVI 和 ET 的像元相关性分析来看(图 6),NDVI 越高的像元,其 ET 值也越高,在盐池县全境 31 490 个像元中,二者的相关系数达到了 0.63( $p < 0.001$ )。这一结果说明,在不同覆盖度(不同 NDVI)下生态系统的 ET 存在差异,高覆盖度的植被类型其蒸散更强,如灌溉农业、森林和高盖度草原。从 NDVI 变化斜率和 ET 变化斜率的相关性分析也可以看出,NDVI 在近 18 a 上升越快的像元,其 ET 也增强的越快。由此可初步判断,盐池荒漠草原植被盖度的增加和植被结构的变化,在一定程度上驱动了区域生态系统蒸散的增强。

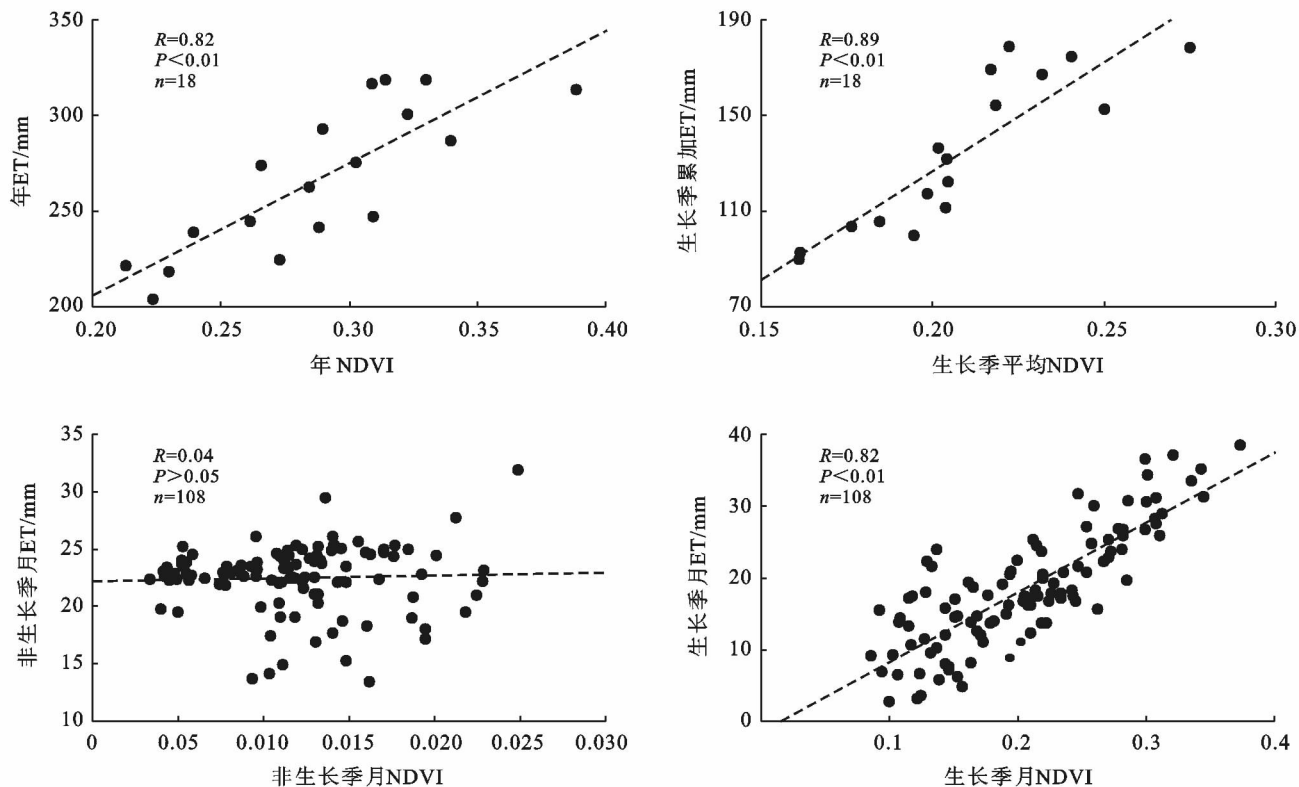


图5 2001—2018年盐池县NDVI与ET间的相关性

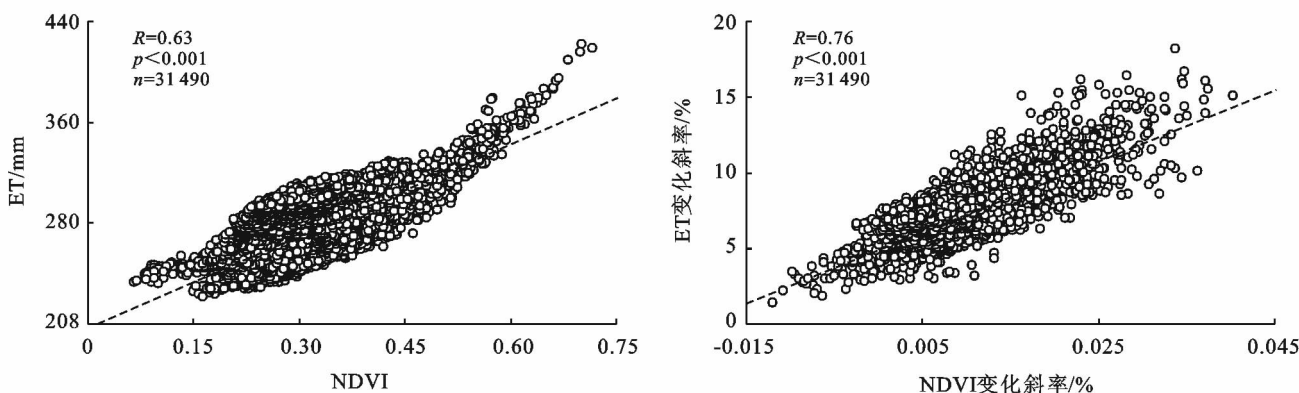


图6 2001—2018年盐池县像元尺度NDVI与ET及二者变化斜率的相关性

进一步对年均的NDVI采用自然断点法分级,并使用ArcGIS软件中的分区统计工具,结合2001—2018年蒸散变化斜率的数据,分析不同NDVI范围内ET的变化情况。结果表明,在NDVI最高值区(0.46~0.72),ET的变化斜率也最大,达到了10.46 mm/a;在NDVI的最低值区(0.06~0.24),ET的变化斜率也最小,只有5.58 mm/a,这一结果再次证实,高植被覆盖区其近18 a的生态系统蒸散增强越快(见表1),即在荒漠草原区域高密度、高盖度的植被结构会产生更大的生态系统蒸散,消耗更多的水资源。

同时,统计了不同NDVI变化趋势下的ET变化

斜率。结果表明,尽管盐池所有区域的ET在近18 a均在增强,但不同NDVI变化趋势下的ET变化斜率存在差异。全县仅有0.078%的区域其植被在退化,NDVI呈显著下降趋势,而这些区域的ET仍然呈现增强趋势,但增强速度在所有类型中最慢。在植被盖度、密度增加,NDVI呈显著上升的区域(占全县65.34%),其ET增强速度快。在NDVI为极显著上升的区域ET增强速度最快,达到了6.72 mm/a(表2)。盐池县通过在荒漠草原实施系列生态治理工程,促使县域内植被盖度、密度明显增强,这也加剧了其生态系统的蒸散耗水,在干旱半干旱地区降水量有限的情况下,快速大量的生态系统水分蒸散增加和耗水

量加大,无疑对这一脆弱生态系统的稳定性带来了压力,一些深根灌木会不断的消耗深层土壤水分,进而导致水分供需平衡失衡。虽然盐池降水量在 2001—2018 年也呈现上升趋势,但蒸散的增强速率明显大于降水增加速率,长期可能会导致人工重建植被生态系统的稳定性下降。

表 1 2001—2018 年盐池县不同 NDVI 流域范围的 ET 变化斜率

NDVI	面积/ km <sup>2</sup>	面积 占比/%	ET 斜率 值
0.06~0.24	790.59	11.69	5.58
0.24~0.28	2 314.66	34.24	5.83
0.28~0.31	2 127.27	31.47	6.29
0.31~0.37	1 098.84	16.26	6.87
0.37~0.46	335.08	4.96	7.70
0.46~0.72	93.16	1.38	10.46

表 2 2001—2018 年盐池县不同 NDVI 变化趋势下的 ET 变化斜率

NDVI 趋势	面积/ km <sup>2</sup>	面积 占比/%	ET 斜率 均值
极显著下降	1.72	0.03	2.79
显著下降	3.01	0.04	3.44
不显著下降	93.38	1.38	4.82
不显著上升	2245.12	33.21	5.79
显著上升	1572.80	23.27	6.22
极显著上升	2843.58	42.07	6.72

### 3 讨论

盐池县 NDVI 的上升,整体植被的好转与人工植被重建实施的系列生态治理工程有关。盐池县沙漠化土地曾占县域面积的 52%,1961—1990 年间,北部的沙漠化面积还扩大了 12.5%,引起了当地政府的高度重视。盐池县天然草原面积占全县总面积的 65.12%,由于当地的气候条件和人类活动的压力,2000 年后草原出现了生态赤字,2002 年底,盐池县开始实施禁牧封育政策<sup>[24]</sup>。同期盐池县还实施了退耕还林、三北防护林、天然林保护等重点生态建设工程,这些项目覆盖境内 73% 荒漠化面积,中强度沙化土地基本得到治理,实现了“人进沙退”,也在荒漠草原上建设和抚育起大面积的人工灌木林<sup>[3]</sup>。截止 2017 年,全县超过  $1.33 \times 10^5$  hm<sup>2</sup> 沙化土地得到有效治理,20 hm<sup>2</sup> 以上的明沙丘基本消除,林木覆盖度、植被覆盖率分别提高到 31% 和 68%<sup>[25]</sup>。

ET 在连接陆地生态系统的碳水循环和能量平衡

中发挥着至关重要的作用,同时也受到植被和环境的动态影响<sup>[26]</sup>。吴荣军等<sup>[16]</sup>利用遥感—过程耦合模型对淮河流域 ET 模拟研究,并对其时空变化特征、不同覆被类型下的区域实际蒸散特征及其主要影响因子进行定量分析。结果表明该区域内农田由于灌溉条件好,土壤水分供应相对充足的原因使得其蒸散贡献量最大,这很好地解释了盐池县 ET 的空间分布中出现的农田斑块高值区的现象。万红莲等<sup>[14]</sup>在探究近 40 a 来干旱时空变化格局及其对植被覆盖的响应时,发现干旱发生最严重的是春季,这与本研究中蒸散的年内变化在春季时达到最低的结果一致。植物在春季开始生长而又没有充足的水分,因此,这是一年中生态系统供水最为匮乏的时期。刘可等<sup>[17]</sup>研究了宁夏草地 2000—2014 年的蒸散时空分布格局与演变规律,其研究结果表明盐池县所在区域的蒸散变化趋势小于与本文中得到结果,这可能是因为两者研究的时间序列长度不同,盐池县在 2015—2018 年间降雨量与蒸散量显著增加,蒸散增加的趋势上涨。

大量的人工植被的种植,使得植被覆盖度增加,对生态系统的生态水文过程产生了重要的影响<sup>[27-28]</sup>。Zhang 等<sup>[26]</sup>探究了 1982—2013 年全球植被绿化以及气候变化对蒸散的影响,结果表明蒸散呈明显的上升趋势,并且与 NDVI 高度相关( $R=0.91, p<0.01$ ),这与本文得到的结论一致。盐池县面积小空间异质性低,加之其所在的半干旱区特有气候条件,在大量的造林工程实施后也在一定程度上加速了研究区域的蒸散。王雅舒等<sup>[29]</sup>分析了退耕还林还草工程对黄土高原退耕区 ET 的影响,结果表明 ET 的增加主要归因于植被增多,并且指出在退耕阶段植被蒸腾与土壤蒸发相对对 ET 的贡献率更大,也反应了植物生长对 ET 的增加有很大的影响。随着植被盖度增加,土壤蒸发占比减小<sup>[29]</sup>,如果未来土壤水分出现持续减少,可能会使植被的生长受到限制,从而影响到生态恢复的效果。由于在降雨量低于 500 mm 的区域可以忽略地表径流的产生<sup>[30]</sup>,因此在盐池荒漠草原降雨是水分的来源,ET 是水分耗散的主要途径。本研究分析了蒸散与降水的关系,虽然自 2001 年以来年降水量高于年蒸散量,但蒸散的增加趋势明显强于降水的增加趋势,这种情况持续下去可能会打破盐池荒漠草原的水分供需平衡关系,从而影响到荒漠草原生态系统的稳定性。已有研究表明,气候变化也会加剧水文循环从而影响 ET<sup>[31]</sup>,尤其在水分限制的区域,温度与降水会影响 ET 的年际变化<sup>[32]</sup>,由于全球变暖趋势,影响地表蒸发,进而使蒸散增加<sup>[33]</sup>。本研究中部分植被退化的区域,蒸散仍呈现上升趋势可能是由

于气候变暖所致。由于蒸散的复杂性,降水与温度造成的影响还需要进一步的深入研究。

## 4 结论

利用 2001—2018 年 MODIS 的 NDVI 与 ET 时间序列的影像产品,定量的研究了植被和蒸散的时空变化规律,探究了盐池荒漠草原人工植被重建对区域生态系统蒸散的影响,得到以下结论:

(1) 盐池整体植被覆盖较低,但近十几年在持续增强,人工植被重建取得了显著的成效。2001—2018 年盐池县年均 NDVI 介于 0.213 0~0.388 7,年际间呈上升趋势,增长幅度为 0.006/a,全县 98.55% 的区域 NDVI 在上升。

(2) 区域生态系统蒸散较弱,但近十几年也表现出增强趋势。2001—2018 盐池县年均 ET 为 266.73 mm,年际间呈波动增强趋势,增长幅度为 6.27 mm/a ( $p < 0.01$ ),空间上表现为由西北向西南逐渐增高的特征。

(3) 区域生态系统蒸散的增强与人工植被重建活动有关。年际间,ET 与 NDVI 呈显著正相关,植被生长越茂盛的年份,生态系统蒸散越强;年内 ET 与 NDVI 在生长季呈显著正相关,而在非生长季不相关。

综上所述,荒漠草原人工植被重建提高了区域植被覆盖,也增强了生态系统蒸散,增加了生态系统水分消耗。在水资源有限的半干旱地区,人工植被重建过程可能会影响到生态系统的稳定性。今后,应以生态水文学理论为基础,制定适合干旱半干旱区水文循环过程的生态重建政策。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 潘庆民,薛建国,陶金,等. 中国北方草原退化现状与恢复技术[J]. 科学通报,2018,63(17):1642-1650.
- [2] 侯彩霞,周立华,文岩,等. 社会—生态系统视角下沙漠化逆转定量评价:以宁夏盐池县为例[J]. 生态学报,2017,37(18):6186-6195.
- [3] 郑琪琪,杜灵通,官菲,等. 基于 GF-1 遥感影像的宁夏盐池柠条人工林景观特征研究[J]. 西南林业大学学报:自然科学,2019,39(1):152-159.
- [4] 邱国玉. 陆地生态系统中的绿水资源及其评价方法[J]. 地球科学进展,2008,23(7):713-722.
- [5] McCabe M F, Wood E F. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,105(4):271-285.
- [6] Yair A, Raz-Yassif N. Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length [J]. Geomorphology, 2004,61(1/2):155-169.
- [7] 邹慧,高光耀,傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报,2016,36(11):3127-3136.
- [8] 彭海英,李小雁,童绍玉. 干旱半干旱区草原灌丛化研究进展[J]. 草业学报,2014,23(2):313-322.
- [9] 赵亚楠,周玉蓉,王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报,2018,29(11):3577-3586.
- [10] 赵亚楠,杜艳艳,马彦平,等. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤有机碳变化及其空间格局预测[J]. 应用生态学报,2019,30(6):1927-1935.
- [11] 阿布都沙拉木·吐鲁甫,买买提·沙吾提,依力亚斯江·努尔麦麦提,等. 渭—库绿洲土地利用/覆被变化与蒸散量时空特征分析[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2018,54(3):340-347.
- [12] 杜灵通,田庆久. 宁夏植被覆盖动态变化及与气候因子的关系[J]. 中国沙漠,2012,32(5):1479-1485.
- [13] 宋乃平,杜灵通,王磊. 盐池县 2000—2012 年植被变化及其驱动力[J]. 生态学报,2015,35(22):7377-7386.
- [14] 万红莲,王静. 多尺度下宝鸡地区干旱动态格局演变及其与植被覆盖的关系[J]. 生态学报,2018,38(19):6941-6952.
- [15] 季树新,常学礼,李鹏,等. 山东半岛 2000—2014 年蒸散发时空分异特征[J]. 水文,2017,37(6):84-90.
- [16] 吴荣军,邢晓勇. 不同植被条件下实际蒸散的变化特征及其影响因子:以淮河流域为例[J]. 应用生态学报,2016,27(6):1727-1736.
- [17] 刘可,杜灵通,侯静,等. 2000—2014 年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J]. 草业学报,2018,27(3):1-12.
- [18] 方楷,宋乃平,安慧,等. 宁夏盐池荒漠草原植被的数量分类和排序[J]. 生态学杂志,2011,30(12):2719-2725.
- [19] 王涛,宋翔,颜长珍,等. 近 35 a 来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1351-1356.
- [20] Mu Qiaozhen, Heinsch F A, Zhao Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,111(4):519-536.
- [21] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(8):1781-1800.
- [22] 刘可,杜灵通,侯静,等. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征[J]. 生态学报,2018,38(6):1885-1896.
- [23] 杜灵通,侯静,胡悦,等. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征[J]. 农业工程学报,2015,31(14):209-216.



- [10] 田佳,卞莹莹,于江珊,等. 贺兰山3种乔木单根及根土复合体力学特性[J]. 水土保持学报,2018,32(6):123-129.
- [11] 崔鹏,王道杰,韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应:以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学,2005,3(3):60-64.
- [12] 王道杰,崔鹏,朱波,等. 金沙江干热河谷植被恢复技术及生态效应:以云南小江流域为例[J]. 水土保持学报,2004,18(5):95-98.
- [13] 沈有信,张彦东,刘文耀. 泥石流多发干旱河谷区植被恢复研究[J]. 山地学报,2002,20(2):188-193.
- [14] 郭灵辉,王道杰,陈东,等. 蒋家沟泥石流区新银合欢细根固土效应[J]. 水土保持通报,2011,31(5):85-89.
- [15] Waldron L J. The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil[J]. Journal of the Soil Science Society of America,1977,41(5):843-849.
- [16] 洪苗苗,汪霞,赵云飞,等. 浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J]. 山地学报,2018,36(1):107-115.
- [17] 李宁,陈丽华,杨苑君. 油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J]. 北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [18] 周萍,文安邦,严冬春,等. 三峡库区紫色土坡耕地本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J]. 水土保持通报,2017,37(3):1-6.
- [19] 李晓凤,陈丽华,王萍花. 华北落叶松根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):82-87.
- [20] 田佳,刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J]. 中国水土保持,2007(10):34-36.
- [21] 曹云生,陈丽华,盖小刚,等. 油松根系的固土力学机制[J]. 水土保持通报,2014,34(5):6-10,14.
- [22] Zhang Chaobo, Zhou Xia, Jiang Jing, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2019,172:140-147.
- [23] Ni Junjun, Leung A K, Ng C W W. Influence of plant spacing on root tensile strength of *Schefflera arboricola* and soil shear strength[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2019,15(2):223-230.
- [24] Krairoj M, Apiniti J. Influence of root suction on tensile strength of *Chrysopogon zizanioides* roots and its implication on bioslope stabilization [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(2):275-284.
- [25] 颜正平. 植物根系分布生态学理论与体系模式之研究[J]. 水土保持学报,2005,12(5):1-6.
- [26] 蒋定生,范兴科. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报,1995,9(2):1-8.
- [27] 陈爱民,严思维,林勇明,等. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J]. 北京林业大学学报,2016,38(9):62-70.

(上接第15页)

- [24] 侯彩霞,周立华,文岩,等. 社会—生态系统视角下农户对禁牧政策的适应性:以宁夏盐池县为例[J]. 中国沙漠,2018,38(4):872-880.
- [25] 夏翠珍,廖杰,郭建军,等. 1983—2017年宁夏盐池县生态治理政策的类型与变化:基于政策工具视角[J]. 中国沙漠,2019,39(3):107-116.
- [26] Zhang Ke, Kimball J S, Nemani R R, et al. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration [J]. Scientific Reports, 2015,5:15956.
- [27] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, et al. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis [J]. Ecology Letters, 2011,14(7):709-722.
- [28] Howard K S C, Eldridge D J, Soliveres S. Positive effects of shrubs on plant species diversity do not change along a gradient in grazing pressure in an arid shrubland [J]. Basic and Applied Ecology, 2012,13(2):159-168.
- [29] 王雅舒,李小雁,石芳忠,等. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发[J]. 科学通报,2019,64(5):588-599.
- [30] Wilcox B P. Shrub control and streamflow on rangelands: A process based viewpoint [J]. Journal of Range Management, 2002,55(4):318.
- [31] Liu Qiang, Yang Zhifeng. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2010,395(3/4):226-234.
- [32] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India) [J]. Agricultural Water Management, 2004,69(1):1-11.
- [33] Sun Yan, Piao Shilong, Huang Mengtian, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models [J]. Global Ecology and Biogeography, 2016,25(3):311-323.