

# 不同降水年型黄土高原半干旱撂荒草地水分收支特征

戚超<sup>1,2</sup>, 刘晓<sup>1,2</sup>, 闫艺兰<sup>1,2</sup>, 袁国富<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,  
北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:**以黄土高原六道沟流域半干旱撂荒草地为研究对象,根据2014—2017年连续观测得到的降水量( $P$ )、蒸散量( $ET$ )、土壤贮水量( $S$ )和植被组成等数据,研究了不同降水年型下撂荒草地的水分收支特征。结果显示:(1)观测前期平水年下0—50 cm土层土壤贮水量呈现缓慢下降趋势,以第三年的一场暴雨(109.60 mm/d)为分界,后期土壤贮水量总体增加,但波动幅度大增,受蒸散量增加的影响,土壤水分消耗明显;(2)年总蒸散量呈逐年升高的趋势,在平水年下,地表蒸散年际变化主要受气候条件影响,丰水年下,地上生物量的作用明显;(3)水分收支呈现季节性,2—6月为撂荒草地的缺水期,7月—次年1月为丰水期,四年观测结果显示草地处于总体水分亏缺状态(总亏缺165.60 mm),存在对深层土壤水(50 cm以下)的大量消耗。研究结果表明:撂荒草地水分的持续损失是导致撂荒草地发生演替的重要原因,演替过程中植物深层土壤水的大量消耗可能会导致形成的次生草地土壤水分条件更差,需要加强人为干预措施,防止草地再次退化。

**关键词:**土壤水分;水分收支;涡度相关;黄土高原;撂荒草地

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0106-07

## Water Budget of Abandoned Steppe in Semiarid Area on the Loess Plateau in Different Rainfall Pattern Years

QI Chao<sup>1,2</sup>, LIU Xiao<sup>1,2</sup>, YAN Yilan<sup>1,2</sup>, YUAN Guofu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Taking abandoned steppe in succession of Liudaogou watershed in the semi-arid area on the Loess Plateau as the research site, we studied the characteristics of the water budget of the successive steppe during the years with different rainfall patterns by using the data of precipitation ( $P$ ), evapotranspiration ( $ET$ ), soil moisture ( $S$ ), vegetation structure during 2014—2017. The results indicated that: (1) in the early stage of observation, the soil water content in 0—50 cm soil layer showed a slowly decreasing trend during years with normal annual rainfall; after the rainstorm (109.60 mm/d) in the third year, the soil water content in the later stage increased generally, but fluctuated greatly, and the soil water consumption was obvious with the increase of  $ET$ ; (2) the annual total  $ET$  increased year by year, and the interannual variations of  $ET$  were mainly influenced by climatic conditions during years with normal annual rainfall, but affected by biomass during rainy years; (3) the water budget showed seasonal characteristics, and the dry period for steppe was from February to June, while the period from July to next year's January was the rainy season; the four-year observation showed that the steppe was in a state of water deficit (165.60 mm in all), and there was a large amount of consumption of deep soil water (below the depth of 50 cm). The results showed that the continuous loss of soil water in steppe was the important cause of steppe succession, and the huge consumption of deep soil water during the successive process may lead to the worse soil water condition for the secondary

收稿日期:2018-03-28

修回日期:2018-04-17

资助项目:国家自然科学基金“黄土高原土壤水分有效性及其地带性分布规律”(41390463)

第一作者:戚超(1993—),女,山东龙口人,硕士研究生,研究方向为生态水文。E-mail:qichaocheer@163.com

通信作者:袁国富(1971—),男,湖北洪湖人,副研究员,博士,主要从事生态水文与生物气象研究。E-mail:yuangf@igsrr.ac.cn

steppe. Therefore, anthropogenic intervention needs to be reinforced in case of further steppe degradation.

**Keywords:** soil moisture; water budget; eddy covariance method; Loess Plateau; abandoned steppe

黄土高原大部分地区处于干旱半干旱区,水资源是限制该区生态环境改善的主要因素<sup>[1]</sup>,揭示黄土高原土层的水分收支状况是理解黄土高原水资源状况的重要方面,能为黄土高原植被恢复和生态建设提供重要依据。大量的研究围绕黄土高原土壤水分变化展开<sup>[2-4]</sup>,揭示了土壤水分的时空变化规律<sup>[5-6]</sup>,为黄土高原的生态治理提供了重要依据。然而,导致土壤水分变化的直接因素,即土壤水分的收支过程及其变化特征并没有得到深入观测和分析,对地表蒸散过程的准确和连续观测是阻碍土壤水分收支分析的主要原因之一<sup>[7-8]</sup>。

退耕还林还草是过去 30 a 黄土高原水土流失治理的主要措施<sup>[9-10]</sup>,退耕后形成的大量人工植被或撂荒地是当前黄土高原地表主要的植被景观。研究表明,大量不合理的人工林植被破坏了黄土高原水量平衡,形成了广泛存在的土壤“干层”<sup>[11-13]</sup>和“小老树”<sup>[14]</sup>等新问题。另一方面,未受人工干预的撂荒地的植被演替与土壤水分变化的关系缺乏深入研究。撂荒地植被的自然恢复是黄土高原生态治理的一种方式,但是否需要人为干预以加快生态环境好转,需要我们进一步深入分析撂荒地的水分收支状况及其与植被变化的关系,为人为干预撂荒地的生态恢复提供科学认知。

本研究通过涡度相关方法对黄土高原北部半干旱区一片撂荒草地的蒸散(ET)进行连续观测,同时观测降水(P)和土壤水分(S),分析不同降水年型下演替撂荒地植被水分收支过程,探讨撂荒地演替过程中的水分收支特征在指导植被恢复过程中的意义,以期为黄土高原半干旱草地的植被建设提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 观测区概况

研究区选在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站附近峁顶的一处平坦地块,位于黄土高原六道沟小流域(北纬 38°47′36″,东经 110°22′23″,海拔 1 256 m)。该区年平均气温 7~9℃,年平均降水量 437.4 mm,季节、年际变化大,6—9 月份降水可达全年降水的 70%~80%<sup>[15]</sup>,属于温带大陆性半干旱气候。研究区为片沙覆盖下的梁峁状丘陵区,人工植被主要有苜蓿(*Medicago sativa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、

山杨(*Populus davidiana*)、小叶杨(*Populus simonii*),自然植被优势种为长芒草(*Stipa bungeana*),其次为草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、茵陈蒿(*Atemisia capillaries*)、赖草(*Leymus secalinus*)、芡蒿(*Artemisia giraldii*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、狗娃花(*Heteropappus hispidus*)、苦菜(*Lectuce tatarica*)等<sup>[16]</sup>,属于黄土高原典型半干旱草地植被,生长季为 4—10 月。

观测区域为一片约 60 m×100 m 的撂荒草地,2014 年 5 月 16 日开始观测时已撂荒 2 a,主要植物种包括赖草、草木樨状黄耆与兴安胡枝子等,典型半干旱天然草地中的优势种长芒草在这片区域并不占优势。观测区域植被平均覆盖度为 72%,但由于枯落物的存在,地表几乎没有裸土出现。

### 1.2 数据获取与处理

1.2.1 地表蒸散量 地表蒸散采用开路式涡度相关系统(EC)获取,观测时间从 2014 年 5 月 16 日起至 2017 年 9 月 30 日。涡度相关系统由三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell, Logan, USA)、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 快速响应红外分析仪(LI 7500, Li-COR, Lincoln, USA)和数据采集器(CR 3000, Campbell, Logan, USA)组成,主要用于测量地表与大气的水汽和 CO<sub>2</sub> 通量交换,仪器架设高度为 2 m,采样频率为 10 Hz。对于涡度相关系统获取的水汽通量原始数据,先利用通量数据处理软件 Eddy Pro 将原始数据处理为 0.5 h 的通量数据,再将由于降水、断电、仪器故障等造成的异常数据剔除后进行插补。对于连续缺失少于 2 h 的通量数据,在半小时尺度上采用线性内插法进行插补<sup>[17]</sup>得到日蒸散量。对于连续缺失多于 2 h 的通量数据,在日尺度利用神木气象站气象数据,采用 FAO—PM 方法插补缺失的实际日蒸散数据<sup>[18]</sup>。

1.2.2 土壤贮水量 土壤体积含水量数据通过土壤湿度传感器(Hydra Probe II)连续自动观测获取,采样时间为 2014 年 5 月 16 日至 2017 年 9 月 30 日。土壤湿度传感器分别安装在 5, 10, 20, 30, 50 cm 土深处,根据各深度土壤体积含水量计算得到 50 cm 厚土层贮水量,即:

$$S = (5 \times \theta_5 + 5 \times \theta_{10} + 10 \times \theta_{20} + 10 \times \theta_{30} + 20 \times \theta_{50}) / 100 \quad (1)$$

式中: $S$  为 50 cm 厚土层的土壤贮水量(mm); $\theta_5, \theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30}, \theta_{50}$  分别为 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—50 cm 厚土层土壤体积含水量(%)。

1.2.3 其他气象数据 太阳总辐射( $R_s$ )、空气温度( $T_a$ )、相对湿度( $H$ )、风速( $WS$ )、降水量( $P$ )等常规气象数据由神木气象站获得。

1.2.4 植被调查与植被参数的计算 植被调查于 2014—2017 年各年生长季盛期(7 月下旬)进行,在撿荒草地和附近的原生草地各随机选取 6 个 1 m×1 m 的样地,调查物种数目( $N$ )以及各植物种的平均高度( $H_i$ )、平均盖度( $CO$ )、地上生物量( $W$ )等。将地上活体植物分种齐地剪割,带回实验室,放入烘箱烘干 24 h,称取干重(精度 0.01 g),得到地上生物量。

观测到的数据用来计算表征植被变化的参数。其中优势种的确定通过重要值(IV)来判断,重要值是植物种群在群落中作用的综合性数量指标<sup>[19-20]</sup>。由于实际野外观测中,长芒草等丛生草本植物的相对频度的测量方法误差较大,因此,重要值的计算采用植物的相对高度和相对盖度,即:

$$IV=(RHI+RCO)/2 \tag{2}$$

式中: $RHI$  为相对高度(%); $RCO$  为相对盖度(%)。 $RHI$  的计算方法为:

$$RHI=100\times H_i/\sum H_i \tag{3}$$

式中: $H_i$  为野外实测的某种群的平均高度; $\sum H_i$  为样方中所有种群平均高度之和。 $RCO$  的计算方法与此类似。对群落各植物种的重要值从大到小排序,从前往后依次累加重要值,重要值之和超过群落所有植物种重要值总和的 50% 时的所有前排植物种定为优势种。

另外还计算获取了物种多样性指数,主要包括 Patrick 丰富度指数( $Pa$ )和 Shannon-wiener 多样性指数( $H'$ )<sup>[21]</sup>。

### 1.3 水分收支的计算

本研究以 0—50 cm 土壤层为对象,根据水量平

衡原理,某一时段内单位体积土壤层的水分收支( $D$ )表述为:

$$D=P-ET-\Delta S \tag{4}$$

式中: $P$  为时段总的降雨量(mm); $ET$  为时段总的蒸散量(mm); $\Delta S$  为 50 cm 厚土层土壤贮水量的变化量(mm),等于时段末土壤贮水量减去时段初土壤贮水量。

根据定义,水分收支项  $D$  描述了生态系统产流或渗漏到深层土壤的水分补给能力。当  $D$  为正值时,表明土壤层有多余水分,产生径流或发生深层渗漏,当  $D$  为负值时意味着草地生态系统需获取 50 cm 以下的深层土壤水的补给以满足地表蒸散的需要。 $D$  的变化反映了生态系统产水和耗水特征,是理解黄土高原水资源利用的重要指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被变化

通过该区优势种的调查(表 1)可以看出,4 a 间原生草地优势种以长芒草为主,组成简单;撿荒草地优势种组成复杂,赖草占据主导地位,其次为草木樨状黄耆与兴安胡枝子,与原生草地优势种组成差异大。从物种丰富度和多样性的逐年变化特征看,撿荒草地物种数量逐年减少,从 2014 年的 22 种减少到 2017 年的 12 种(图 1A),物种多样性指数( $H'$ )也逐年下降,从 2014 年的 2.82 下降到 2017 年的 2.18 (图 1B);与此对照,原生草地的物种数量和物种多样性在四年间维持在稳定状态,物种数量 8 个左右(图 1A),远少于撿荒草地,多样性指数维持在 1.80 左右(图 1B),也明显低于撿荒草地。另外,对撿荒草地长芒草地上生物量(干重)的分析发现,2014—2017 年长芒草生物量占总的地上生物量的占比分别是 7.24%,19.26%,15.16%,17.25%,呈现逐年增加的趋势(2015 年占比最大可能与该年降水量最少相关,具体数据见后面展示)。植被调查的结果显示,撿荒草地处于向原生草地植被方向的演替过程中。

表 1 2014—2017 年撿荒草地与原生草地优势种变化

草地类型	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
撿荒草地	赖草、茵陈蒿、白草、兴安胡枝子、草木樨状黄耆	赖草、草木樨状黄耆、兴安胡枝子	赖草、兴安胡枝子、草木樨状黄耆	赖草、草木樨状黄耆、兴安胡枝子
原生草地	长芒草、茵陈蒿	长芒草、茵陈蒿	长芒草、草木樨状黄耆	长芒草、兴安胡枝子

注:优势种按其重要值由大到小排序。

撿荒草地与原生草地地上生物量变化过程呈相同的年际变化趋势(图 1C),均呈现 2014—2015 年下降,之后逐年上升的趋势,表明撿荒草地和原生草地具有相似的外在环境条件,环境对植被生物量的影响趋势一致。

### 2.2 降水量和其他气象要素

结合神木气象站数据,研究区观测期间气象要素的年际变化如表 2 所示。在观测的 4 a 中,太阳总辐射、空气温度、相对湿度和风速呈现了一定的年际变

化,年际变率在 0.31%~8.23%波动。其中,太阳总辐射、空气温度在前两年呈上升趋势,但在后两年呈

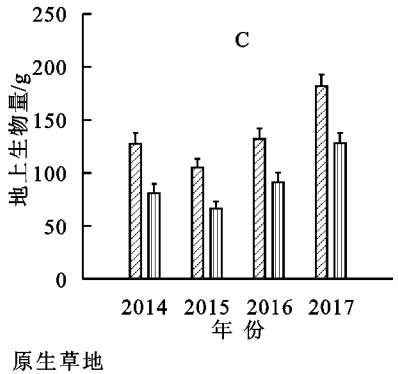
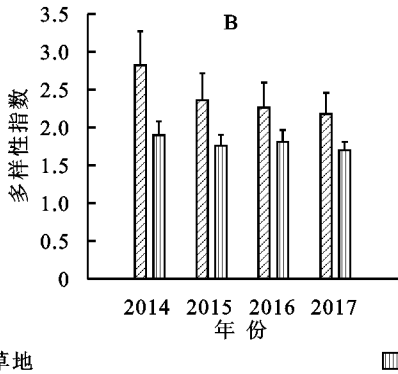
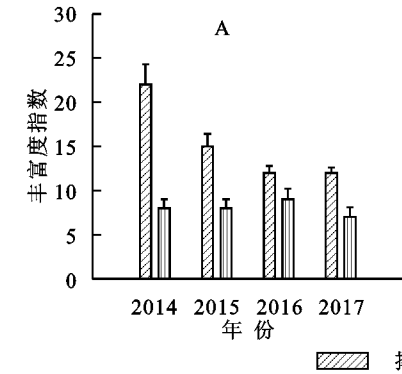


图 1 2014—2017 年撂荒地与原生草地多样性指数和地上生物量的年际变化

表 2 2014—2017 年气象要素年均值与年际变化					
年份	太阳辐射 $R_s/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	2 m 处空气温度 $T_a/(^{\circ}\text{C})$	相对湿度 $\text{RH}/\%$	风速 $\text{WS}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	年降水量 $P/\text{mm}$
2014	15.99	9.60	47.16	2.25	405.40
2015	16.03	9.71	49.36	2.33	388.40
2016	16.00	9.28	51.04	2.35	686.90
2017	15.98	9.26	50.78	2.34	606.10
年际变率/%	0.31	4.86	8.23	4.44	76.85

降水量的年际变率达到了 76.85%,显示了很大的年际变化。2014 年、2015 年、2016 年、2017 年的降水距平百分率分别为-7.31%,-11.22%,57.01%,38.57%,显示 2014 年、2015 年降水偏少,且 2015 年在观测的 4 a 中降水量最少(388.40 mm);2016 年和 2017 年降水量偏多,其中 2016 年降水量达 686.90 mm。该区多年平均降水量为 437.40 mm,根据降水距平百分率评判旱涝年标准<sup>[22-23]</sup>,观测的 4 a 的降水年型分别为:2014 年、2015 年为正常年、2016 年为大涝年、2017 年为偏涝年。

总体上,在观测的 4 a 间,降水的年际变率大,呈现了明显的不同降水年型,同时,其他气候因子也都呈现了一定的年际变化。这些条件为分析不同降水年型下的水分收支以及蒸散量的变化特征及其气候控制因素提供了理想的气象条件。在后面的分析中,我们将 2014 年和 2015 年定义为平水年、2016 年和 2017 年定义为丰水年,用于分析不同降水年型下草地水热交换的变化特征及差异。

2.3 土壤贮水量

对 0—50 cm 土层土壤贮水量的连续测量显示,土壤贮水量的大小以 2016 年 7 月 8 日的一场大暴雨(109.60 mm/d)为分界,在此之前,土壤贮水量总体呈现缓慢下降趋势,2016 年 7 月 8 日以后,一直到观测时间结束,降水量进入多雨气候年型(图 2),0—50 cm 土层贮水量整体有所增加,但在降水量较少时

下降趋势;相对湿度和风速在前 3 a 呈上升趋势,而第 4 年略有下降。

段,仍然能看出贮水量的快速下降,显示土壤水分的消耗快。

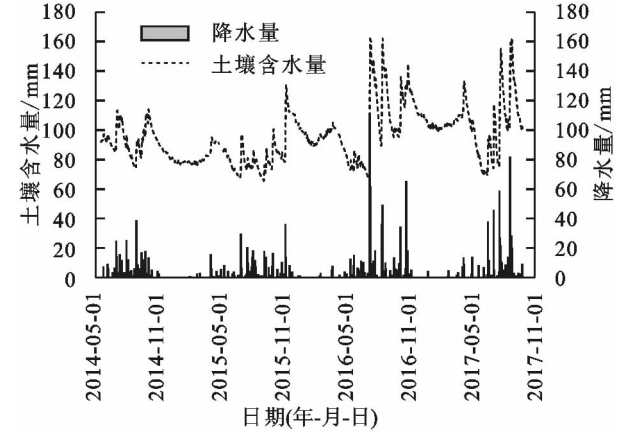


图 2 2014—2017 年 0—50 cm 土壤贮水量(S)与降水量(P)逐日变化

土壤水分是影响植被生物量的主要因素,我们分析了土壤贮水量在生长季和非生长季的年际变化特征,及其与降水量的关系(表 3)。数据中生长季是指当年的 4 月至 10 月,非生长季是指前一年的 11 月至当年的 3 月。从变化趋势看,生长季土壤贮水量的年际变化趋势与同时期降水量变化趋势并不完全一致,突出表现在多雨年份的 2016 年和 2017 年,而非生长季的年际变化趋势则受到上一年度土壤贮水量及同一时期降雨量的双重影响(表 3)。进一步对比土壤贮水量年际变化趋势与地上生物量的年际变化趋势,发现非生长季(即生长季前)的土壤贮水量的变化趋势与地上生物量的趋势更一致,而生长季的土壤贮水量的年际变化趋势,尤其是后两年的年际趋势与地上生物量的年际变化趋势并不相似(表 3,图 1C)。这个结果暗示,与生长季土壤贮水量相比,生长季前的非生长季土壤贮水量对研究区植被生物量的影响更大。

2.4 蒸散量

蒸散量的年内季节变化呈现“单峰”特征(图 3),

其中在非生长季的 1—3 月蒸散量维持在较低水平,月蒸散量通常低于 20 mm。4 月进入生长季后,蒸散量开始明显升高,直至在 7—8 月份生长盛期达到年内最大值。进入生长后期,蒸散量逐渐降低,在冬季落回年内最低值,最低月蒸散量不超过 5 mm。全年 4—10 月蒸散量占比大,2015 年、2016 年两个完整观测年份的 4—10 月份蒸散量分别占全年蒸散量的 89.94%,89.57%。由于 4—10 月正是该地区的生长季,显示该区域年蒸散量的大小受到植被生长的显著影响。

表 3 2014—2017 年生长季与非生长季平均土壤贮水量与同期降水量

年份	非生长季		生长季	
	土壤贮水量 $S_g/\text{mm}$	降水量 $P_g/\text{mm}$	土壤贮水量 $S_{ng}/\text{mm}$	降水量 $P_{ng}/\text{mm}$
2014	—	18.40	94.20	394.80
2015	80.62	6.00	80.31	315.60
2016	99.06	83.20	102.67	661.90
2017	107.82	22.00	103.82	590.10

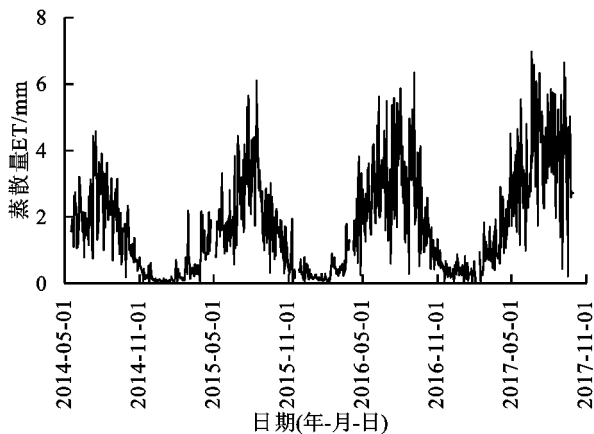


图 3 2014—2017 年撂荒草地蒸散量(ET)逐日变化

观测期间蒸散的年总量呈现逐年增加的趋势,2014—2017 年年总蒸散量分别为 342.19(始于 5 月 16 日),478.38,600.70,665.48 mm(截至 9 月 30 日)(表 4)。由于 2014 年、2015 年降雨量为平水年、2016、2017 为丰水年,蒸散量的年际变化首先体现出降水的总体控制特征,2014、2015 年的年总蒸散量明显小于 2016 年、2017 年降水量偏大的年份。以 2015、2016 年两个完整观测年对比,2016 年大涝年(降雨量 686.90 mm)蒸散量为 600.70 mm,2015 年正常降雨年份(降雨量 388.40 mm)蒸散量仅有 478.38 mm(表 4)。然而在平水年下,2014 年较 2015 年降雨量多而蒸散量少(表 2、4),同时在丰水年下,2016—2017 年与平水年的趋势一致,即年降雨量多的年份(2016)蒸散量比降雨量少的年份(2017)蒸散量要低(表 2、4)。这个结果表明,在降水量影响的大背景下,年蒸散量的大小还受到其他因素影响。

进一步分析观测结果显示,在 2014—2015 年的 2 a 平水年中,2015 年尽管降水量、土壤贮水量和生物量均小于 2014 年(图 1、2),但是年平均太阳辐射、年均气温和年平均风速均大于 2014 年(表 2)。这个结果暗示平水年下,气候因子对蒸散量的影响明显。而在 2016 至 2017 年的大涝年中,太阳辐射、风速和降雨量等气候因子整体有所下降,但蒸散量仍然继续增加,表明气候因子在丰水年的作用不明显。但在 2016 至 2017 年间,观测场地的生物量有明显增加,增加幅度达 37.90%(图 1C),暗示了植被生物量在丰水年下对蒸散量大小的影响明显。

## 2.5 水分收支

水分收支( $D$ )逐月变化如图 4 所示。月值变化范围在  $-46.49 \sim 93.55 \text{ mm/month}$ 。总的来说,2—6 月可定义为黄土高原半干旱草地的缺水期,7—来年 1 月可定义为该区丰水期。在 2—6 月,特别是 5 月、6 月份,植物逐渐进入生长盛期,蒸散作用增强,但春旱严重,降水量低于蒸散量, $D$  通常小于 0,表明这一阶段深层土壤水向上补给植物水分的消耗。7—8 月,黄土高原进入雨季,雨量丰沛且多暴雨,降水量充裕,水分收支总体上是正值,意味着这一阶段有水分下渗补给深层土壤水或形成径流。9 月和 10 月的水分收支在不同年份之间存在较大差异,这主要与降雨量的波动较大有关,当降雨量较少时,9 月和 10 月会表现为水分亏缺(2017 年 9 月降水量 21.00 mm,水分收支为  $-30.82 \text{ mm}$ ),但当降雨量较大时,则表现出水分冗余(2016 年 10 月降水量 155.70 mm,水分收支为  $78.52 \text{ mm}$ )。11 月至第二年 1 月的水分收支整体呈现为较低水平的水分冗余。

从不同年份看(表 2、4),2014 年为平水年,从 5 月份开始统计的结果显示总体水分收支几乎平衡,仅有 0.62 mm 的冗余,2015 年出现 108.69 mm 的亏缺,在多雨的 2016 年则有 80.46 mm 的水分冗余,但同样多雨的 2017 年,因蒸散量大幅增加,出现了 138.02 mm 的水分亏缺(截至 9 月 30 日)。结果显示,撂荒草地的水分收支除大涝的降雨年型,其余年份均处于水分亏缺状态。

连续四年的水分收支观测发现,在两个平水年和两个丰水年后,观测场地总的水分收支为  $-165.60 \text{ mm}$ ,意味着过去四年,植被消耗深层土壤水分至少达 165.60 mm 的水分。这个结果表明撂荒草地深层土壤(50 cm 以下)处于显著的水分损失过程中,如果维持目前的地表植被组成,将最终导致植物—水分关

系的失衡,从而导致植物的衰败或死亡,这个结果也暗示了撂荒草地此时的植被组成并不应该该区域的

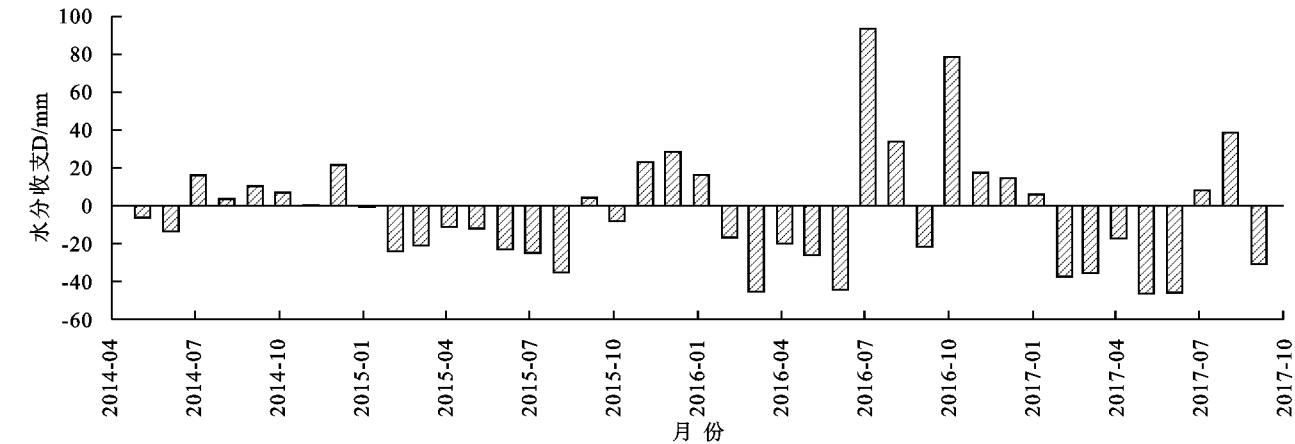


图 4 2014—2017 年土壤水分收支(D)月值

表 4 2014—2017 年观测期间降水量、蒸散量、土壤贮水量变化量、水分收支年值

年份	降水量 <i>P</i> /mm	蒸散量 <i>ET</i> /mm	土壤贮水量 变化量 $\Delta S$ /mm	水分收支 <i>D</i> /mm
2014	329.80	342.19	-13.01	0.62
2015	388.40	478.38	18.71	-108.69
2016	686.90	600.70	5.74	80.46
2017	523.80	665.48	-3.66	-138.02

注:2014 年的各分量由 5 月 16 日开始累计至年底,2017 年的各分量由年初开始累计至 9 月 30 日。

2.6 讨论

降水作为黄土高原主要的水分来源,其年际变化特点决定了该区生态系统的水分亏缺水平。我们的观测结果显示:不同降水年型下,黄土高原半干旱区撂荒草地的水分收支显示了不同变化特征和控制机制。在平水年下,气候对水分收支年际波动的趋势具有主控作用,而在丰水年下,植被地上生物量的大小的影响更加明显,而植被地上生物量的多少与生长季前(非生长季)土壤贮水量的多少密切相关。这一结果首次从观测的角度揭示了在不同降水年型下黄土高原半干旱区水分收支各分量年际变化的关键控制机制,为进一步分析和模拟气候变化对这一区域的影响提供了重要的科学依据。

水分收支分析表明,撂荒草地存在对深层土壤水分的大量消耗<sup>[24-25]</sup>,这一过程必然会导致撂荒草地演替后的次生草地土壤水分状况较原生草地差,撂荒草地连续的水分收支亏缺将降低草地植被承载力,生态系统稳定性将不如原生草地植被。在退耕还林还草后,黄土高原广泛分布着植被覆盖增加但土壤水分减少的区域<sup>[26]</sup>,且土壤干层在不同植被类型中普遍存在<sup>[27]</sup>,人工草地的深层土壤水分亏缺状况甚至差于

水分条件,这是导致撂荒草地向耗水量低的长芒草为主的原生植被演替的重要因素。

人工林地<sup>[28]</sup>。为防止撂荒草地植被再次退化,我们建议撂荒草地在自然演替过程中,可以采取适当的人工措施,比如放牧等降低地上生物量,减少水分消耗,同时演替后的次生草地应注意适当的封育保护措施。

撂荒草地水分收支的观测结果对于黄土高原植被恢复的治理也具有借鉴意义。观测结果表明,植被恢复一定要考虑植物的耗水特征,只有达到植物耗水与供水之间的平衡才能确保植被的稳定。过高的植被水分消耗会导致土壤水的过分消耗<sup>[29-30]</sup>,从而抑制植被的正常生长。我们的连续观测结果从数据上证实了不合理植被恢复措施对黄土高原水量平衡带来的影响。在黄土高原植被人工恢复过程中,应该从土壤水分供给能力的角度出发,考虑植物的耗水特性和耗水量(植被的种植密度),以水分供给能满足植物耗水需要为出发点开展植被的人工恢复治理。

3 结论

(1) 草地的水分收支呈现明显的季节性,总体上,2—6 月可定义为黄土高原半干旱草地的缺水期,7 月—来年 1 月可定义为丰水期;(2) 撂荒草地蒸散量总体大于降水量,水分处于整体耗损中,4 a 间水分损失 165.60 mm,主要表现为深层土壤水分的大量消耗;(3) 在平水年,气候因子是影响蒸散量年际波动的主要因素,在丰水年,生物量对蒸散量的年际波动有重要影响。

撂荒草地持续的负水分收支表明其并不处于稳定状态,是撂荒草地发生演替的重要原因。同时演替过程中对深层土壤水的持续消耗会降低次生草地生态系统的稳定性,建议加强人工保护,防止次生草地再次退化。

## 参考文献:

- [1] 孙文义,邵全琴,刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J]. 自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [2] Chen H, Shao M, Li Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2008,360(1):242-251.
- [3] Gao L, Shao M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. Catena, 2012,95:24-32.
- [4] Li X, Shao M, Jia X, et al. Landscape-scale temporal stability of soil water storage within profiles on the semiarid Loess Plateau of China [J]. Journal of Soils & Sediments, 2015,15(4):1-13.
- [5] Wang Y, Shao M A, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011,151(4):437-448.
- [6] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2013,117(1):33-42.
- [7] 王佩,马琪顺,王家琪,等. 温带草地蒸散发及波文比观测与比较:涡动相关及波文比系统[J]. 草地学报,2017,25(3):453-459.
- [8] 吴雪娇,周剑,李妍,等. 基于涡动相关仪验证的 SEBS 模型对黑河中游地表蒸散发的估算研究[J]. 冰川冻土,2014,36(6):1538-1547.
- [9] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报,2014,69(1):3-14.
- [10] Fu B J, Wang Y F, Lu Y H, et al. The effects of land-use combinations on soil erosion: a case study in the Loess Plateau of China [J]. Progress in Physical Geography, 2009,33(6):793-804.
- [11] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [12] 邵明安,贾小旭,王云强,等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [13] 杨磊,卫伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究,2012,31(1):71-81.
- [14] 陈佳村,李秧秧,左力翔. 陕北沙地小叶杨“小老树”的水力适应性[J]. 生态学报,2014,34(15):4193-4200.
- [15] 赵纯,袁国富,刘晓,等. 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用[J]. 土壤学报,2015,52(6):1438-1444.
- [16] 刘晓,戚超,闫艺兰,等. 不同生态系统水分利用效率指标在黄土高原半干旱草地应用的适宜性评价[J]. 植物生态学报,2017,41(5):497-505.
- [17] Jia X, Zha T, Gong J, et al. Carbon and water exchange over a temperate semi-arid shrubland during three years of contrasting precipitation and soil moisture patterns[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016,228:120-129.
- [18] 徐自为,刘绍民,徐同仁,等. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较[J]. 地球科学进展,2009,24(4):372-382.
- [19] 王育松,上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报:自然科学版,2010,33(2):312-316.
- [20] 孙世贤,卫智军,吕世杰,等. 放牧强度季节调控下荒漠草原植物群落与功能群特征[J]. 生态学杂志,2013,32(10):2703-2710.
- [21] 陈廷贵,张金屯. 十五个物种多样性指数的比较研究[J]. 河南科学,1999(S):55-57.
- [22] 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. 应用气象学报,1997,8(1):26-33.
- [23] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区旱涝指标的研究[J]. 高原气象,1998,17(4):381-389.
- [24] 吴普特,赵西宁,张宝庆,等. 黄土高原雨水资源化潜力及其对生态恢复的支撑作用[J]. 水力发电学报,2017,36(8):1-11.
- [25] 高宇,樊军,彭小平,等. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J]. 生态学报,2014,34(23):7038-7046.
- [26] 王蕾钦,王飞,李朋飞. 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[J]. 水土保持研究,2017,24(6):179-185,193.
- [27] 吕文强,王立,党宏忠,等. 黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J]. 水土保持学报,2015,29(6):233-240.
- [28] 缪凌,董建国,汪有科,等. 黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J]. 水土保持研究,2016,23(2):13-18.
- [29] 易彩琼,王胜,樊军. 黄土高原坡地退耕恢复草地的土壤水分动态[J]. 草地学报,2015,23(6):1182-1189.
- [30] 杨磊,卫伟,莫保儒,等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报,2011,31(11):3060-3068.