

荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应

陈娟¹, 宋乃平^{1,2}, 陈林², 王兴², 王启学²

(1.宁夏大学农学院, 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,
西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘要: 干旱、半干旱区植被恢复与重建对降雨具有高度的依赖性, 降雨格局的任何细微变化对其生态系统均会产生影响。以宁夏盐池县荒漠草原3种主要覆被类型(浮沙地、天然草地和柠条林地)为研究对象, 使用自动气象站、土壤水分仪连续监测2015—2017年降水量和土壤水分数据, 分析了3种覆被类型0—250 cm土层的土壤水分动态及其对不同量级降水的响应。结果表明: 浮沙地土壤水分从表层至深层为增长趋势, 天然草地和柠条林地增加—减少—增加趋势; 水分季节变化分为土壤水分稳定期(12月至翌年2月)、土壤水分积累期(3—5月)、土壤水分消退期(6—8月中旬)和土壤水分恢复期(8月下旬至11月)。5 mm以下的小降水事件对土壤水分几乎无影响; 中等降水事件(5~25 mm)和大降水事件(25~40 mm)对0—20 cm或浮沙地0—40 cm土层土壤水分有补给作用; 40—100 cm土层的水分补充需要特大降水事件。浮沙地对降水响应最敏感, 柠条林地次之, 天然草地最滞后。降水量、降水强度、雨前土壤含水量和土壤物理性质均是影响土壤水分入渗的因素, 而在降水一致时, 土壤类型是决定土壤水分动态的重要因素, 植被对土壤剖面水分具有再分配的作用, 这在干旱区生态系统中尤为重要, 决定了植被类型与土壤类型的对应关系。

关键词: 土壤水分; 降水格局; 覆被类型; 荒漠草原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0198-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.027

Soil Moisture Dynamics and Its Response to Precipitation in Different Cover Types of Desert Steppe

CHEN Juan¹, SONG Naiping^{1,2}, CHEN Lin², WANG Xing², WANG Qixue²

(1.School of Agricultural, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwest China, Yinchuan 750021)

Abstract: Vegetation restoration and reconstruction in arid and semi-arid areas are highly dependent on precipitation, and any slight change in precipitation pattern will have an impact on its ecosystem. Taking three main cover types of desert steppe in Yanchi County of Ningxia, floating sand land, native grassland and *Caragana* woodland as research objects, the precipitation and soil moisture from 2015 to 2017 were continuously observed by automatic weather station and soil moisture meter, the soil moisture dynamics of 0—250 cm soil layer and the responses to different levels of precipitation were analyzed. The results showed that the soil moisture of floating sand land increased from the surface to the deep layers, and the native grassland and *Caragana* woodland had the increasing-decreasing-increasing trends; seasonal changes in water content were divided into stable soil moisture period (December to February of the following year), soil moisture accumulation period (March to May), soil moisture decay period (June to mid-August) and soil moisture recovery period (late August to November). Small precipitation events less than 5 mm had almost no effect on soil moisture; moderate precipitation events (5~25 mm) and heavy precipitation events (25~40 mm) could supplement soil moisture in 0—20 cm soil layer or 0—40 cm soil layer in floating sand land. Extra-large precipitation event was needed for the water supplement of 40—100 cm soil layer. Floating sand land was the most sensitive to precipitation, followed by *Caragana* woodland, and native grassland was the most lagging. Precipitation amount, precipitation intensity, soil water content before precipitation and soil physical properties all affected soil

收稿日期: 2021-04-29

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2019BFG02022); 国家自然科学基金项目(31901367)

第一作者: 陈娟(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事草地生态学研究。E-mail: chenjuan923@qq.com

通信作者: 宋乃平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用与生态过程研究。E-mail: songnp@163.com

water infiltration. When precipitation was consistent, soil type was the important factor determining soil moisture dynamics. Vegetation could redistribute soil profile moisture, which is particularly important in arid region ecosystem, and determines the corresponding relationship between vegetation types and soil types.

Keywords: soil moisture; precipitation pattern; cover type; desert steppe

荒漠草原是最干旱的草原类型,长期以来气候干旱,且波动性强,生态系统稳定性低,因过度放牧和开垦导致退化严重,荒漠化趋势加剧^[1]。荒漠草原区降水以单次降水事件为主,且降水事件发生时间、持续时间和强度变异性大,降水事件的离散性、随机性强,土壤水分通常难以积聚,导致土壤水分的连续性和有效性差^[2],直接影响土地生产力和生态系统弹性,这也是该区干旱的重要原因之一。在植被的生长过程中,降水入渗决定着土壤水分分布特征,从而影响植被的生长情况和稳定性^[3]。降水的变化直接影响降水向植物有效土壤水分的转换^[4],最终将影响植物生长乃至群落空间分布和演替过程,进而使生态系统的组成结构和功能性状发生一定改变^[5]。因此,研究荒漠草原区土壤水分动态及其对降水的响应,能够更好地理解和解释未来降水变化对荒漠草原区生态系统的影响,进而构建良好的植被群落结构并有效控制生态水文过程,形成合理的生态水文格局,以达到荒漠草原生态恢复的目的^[6]。

降水在干旱半干旱地区是通过土壤水分来间接控制生态系统生产力、植物响应程度与物种丰富度^[7]。降水入渗至土壤中一定深度才能有效补充土壤水分,进而被植物利用^[8]。目前,干旱半干旱区关于降水和土壤水分的关系已有大量研究,主要涉及在次降水后灌丛下土壤水分动态变化^[9]、灌丛内对降水的再分配^[10]和沙地水分再分配过程^[11]、不同恢复年限草地在降水下的土壤水分增长过程^[12]、固沙区内外土壤初始状况对入渗的影响^[13]、不同降水量对不同土层的有效补给^[14]、降水前后土壤含水量的时间序列变异规律^[15]、不同雨强条件下坡面入渗率与产流特征^[16]等方面,对于单一植被群落下的土壤水分动态和不同土壤类型对降水响应的研究较多,然而土壤和植被类型形成的地被覆被结构是有规律的,特别是在干旱地区土壤类型与植被类型的对应性强,对土壤和植被组成的综合覆被结构对于降水响应的研究较少。土壤水分动态变化也多集中在黄土高原、荒漠和沙地等,且多为同一植被类型,对于宁夏荒漠草原常见的 3 种覆被类型浮沙地、天然草地和柠条林地的对比研究并不多见。本文以盐池县荒漠草原浮沙地、天然草地和柠条林地 3 种不同覆被类型为研究对象,通过对 2015—2017 年对土壤水分和降水量的连续监测,分析 3 种不同覆被类型土壤水分的动态变化及其

对不同雨量级单次降水的响应,以期科学把握降水格局变化下不同覆被类型的水分效应,为荒漠草原的生态恢复和可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区吴忠市盐池县杨寨子自然村(37°04′—38°10′N,106°30′—107°41′E),该区属于中温带大陆性气候,年平均气温 8.1℃,多年平均降水量 280 mm,降水主要集中于 7—9 月,占全年降水的 60%以上,且年际变化较大。蒸发强烈,年平均蒸发量约 2 136 mm。土壤质地多为沙壤、粉砂壤和沙土,结构松散,肥力较低。研究区的主要物种有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)、大戟(*Euphorbia pekinensis*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、砂珍珠豆(*Oxytropis racemosa*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。研究区内无天然森林,只有人工林,主要为柠条锦鸡儿灌丛(*Caragana korshinskii*)、中间锦鸡儿灌丛(*Caragana intermedia*)和小叶锦鸡儿灌丛(*Caragana microphylla*)等。

1.2 样地选择

在盐池县杨寨子自然村,选择天然草地、柠条林地与浮沙地 3 种不同覆被类型作为试验样地,植被覆盖度分别为 65%,57%,33%,浮沙地主要为一、二年生和多年生草本。地形地貌等环境条件一致。浮沙地的土体构型是整个剖面为风沙土,而天然草地和柠条林地是薄层覆沙灰钙土,土体构型为上覆薄沙层,下为侵蚀灰钙土。样地各土层土壤物理性质见表 1。

1.3 数据获取

于 2015 年 1 月 1 日至 2017 年 10 月 14 日在盐池县杨寨子村试验样地内使用 Vantage Pro2 自动气象观测仪观测气温(℃)、降水量(mm)等气象数据,观测频率为每 0.5 h 观测 1 条气象数据。在浮沙地、天然草地与柠条林地内分别安装多个 H 21 土壤水分仪,将土层分为 10 层(0—5,5—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—150,150—200,200—250 cm)进行测定,测定频率为每 0.5 h 测定 1 条土壤含水量数据;由于获取的数据既有空间差异,也有因安装等原因引起的某些层位传感器数据异常,因此在每一类地类中选取代表性最强的一组数据进行分析。

表 1 研究区 3 种覆被类型土壤物理性质

样地	土层/ cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	饱和 含水率/%	总孔 隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	颗粒组成/%		
							<0.05 mm	0.05~0.1 mm	0.1~2 mm
浮沙地	5	1.73	19.0	34.7	32.2	2.5	11.5	73.6	15.0
	10	1.72	18.4	34.9	30.7	4.2	11.8	74.2	14.1
	20	1.72	18.6	35.2	31.0	4.2	11.5	75.5	13.1
	40	1.70	19.4	35.9	32.0	3.8	12.1	76.2	11.7
	60	1.68	20.0	36.4	32.9	3.5	12.7	72.7	14.6
	80	1.67	21.7	36.9	35.2	1.7	13.8	75.7	10.6
	100	1.62	22.8	38.8	35.9	2.8	15.3	72.3	12.4
	5	1.65	22.6	37.8	36.7	1.1	11.0	81.0	8.0
天然草地	10	1.62	23.0	38.9	37.1	1.8	10.1	83.8	6.1
	20	1.59	23.4	40.0	36.8	3.2	14.7	79.9	5.4
	40	1.64	22.0	38.3	35.4	2.9	16.0	79.5	4.6
	60	1.66	22.6	37.5	36.9	0.6	14.2	78.2	7.7
	80	1.62	23.4	38.8	37.1	1.8	19.0	73.8	7.2
	100	1.64	22.6	38.3	36.2	2.1	28.6	64.6	6.8
	5	1.56	25.5	41.2	39.0	2.2	23.4	75.3	1.3
	10	1.59	23.1	39.8	36.3	3.5	15.9	78.4	5.8
柠条林地	20	1.54	26.2	41.8	39.4	2.4	14.0	81.1	4.9
	40	1.60	24.0	39.7	37.8	1.9	12.5	82.9	4.6
	60	1.62	23.7	39.0	37.5	1.5	14.1	80.3	5.6
	80	1.64	23.7	38.3	37.3	0.9	14.6	77.7	7.8
	100	1.63	23.7	38.6	37.4	1.2	14.4	79.0	6.7

1.4 数据处理

降水时间间隔>24 h, 算作 2 个独立的降水事件, <24 h 则算作 1 个降水事件; 为便于统计分析, 按降水量将降水分级分别以 0.1, 1, 5, 10, 25 mm 为界, 划分为Ⅰ~Ⅴ级^[17]。1 天内有降水发生的时段累加为降水历时; 降水量与降水历时的比值为降水强度^[18]。本研究选取 7 次降水事件进行统计, 降水特征见表 2。使用 Excel 2010、Suffer 11 对相关数据进行处理分析及制图。

表 2 降水特征

编号	降水量/ mm	降水 历时/h	有效降水 时间/h	降水强度/ (mm·h ⁻¹)	最大雨强/ (mm·h ⁻¹)
1	2.8	6	5	0.47	1.00
2	6.2	12	5	0.52	1.80
3	7.8	7	7	1.11	2.00
4	17.8	29	18	0.61	1.60
5	28.2	41	31	0.69	4.60
6	37.6	12	9	3.13	17.78
7	68.6	11	11	6.24	13.72

2 结果与分析

2.1 研究区 2015—2017 年降水变化特征

从表 3 可以看出, 2015—2017 年研究区全年降水总次数分别为 45, 54, 42 次, 且Ⅰ、Ⅱ级小降水发生频率最高, 二者之和分别占全年降水次数的 66.7%, 72.2%, 59.5%; Ⅴ级降水次数有限, 年均不多于 3 次。3 年降水量分别为 210.9, 386.5, 303.8 mm, Ⅰ、Ⅱ级小降水的降水量仅占全年降水量的 18.2%,

16.9%和15.4%, Ⅳ、Ⅴ级降水量之和占全年降水量的 1/2 以上, 分别为 51.7%, 74.0%和 63.8%, 而且降水量越多的年份大降水次数越多, 或者说年降水量主要是由大降水事件决定的。3 个年份的全年降水历时分别为 245, 260, 340 h, 降水历时差异较大。降水量与降水强度呈极显著相关($P<0.01$), 降水强度平均值为 1.25 mm/h。枯水年与其他 2 年相比, 年降水量和降水次数均较小。从图 1 可以看出, 研究区年内降水量分配不均, 2015 年降水主要分布在 4—9 月, 占全年总降水量的 80.8%, 2016 年和 2017 年降水主要分布在 5—10 月, 分别占全年总降水量的 90.1%和 94.2%。

表 3 2015—2017 年各量级降水情况

年份	降水 年型	降水 级别	降水 次数	占降水次数 比例/%	降水量/ mm	降水 历时/h	降水强度/ (mm·h ⁻¹)
2015	枯水年	Ⅰ	16	35.6	8.9	17	0.43
		Ⅱ	14	31.1	29.4	45	0.66
		Ⅲ	9	20.0	63.5	99	0.92
		Ⅳ	5	11.1	69.4	67	1.42
		Ⅴ	1	2.2	39.6	17	2.33
2016	丰水年	Ⅰ	18	33.3	7.5	25	0.34
		Ⅱ	21	38.9	57.9	94	0.77
		Ⅲ	5	9.3	35.3	24	1.56
		Ⅳ	7	13.0	108.7	77	1.55
		Ⅴ	3	5.6	177.2	40	4.37
2017	平水年	Ⅰ	7	16.7	3.0	9	0.34
		Ⅱ	18	42.9	43.7	74	0.76
		Ⅲ	9	21.4	63.3	85	0.79
		Ⅳ	5	11.9	96.6	84	1.40
		Ⅴ	3	7.1	97.2	88	1.11

2.2 2015—2017年不同覆被类型土壤水分动态

从图1可以看出,3种覆被类型在20 cm以上土层土壤水分波动剧烈,随着土层加深,土壤水分对降水的响应存在着不同程度的滞后,波动幅度减弱,响应土层基本在100 cm以上。不同覆被类型土壤水分呈现不同的动态特征。整个土壤剖面上,浮沙地土壤含水量最低值(1.6%~2.0%)基本出现在土壤浅层(0—10 cm),随着土层加深,土壤含水量逐渐增高且稳定,40—250 mm土层土壤水分在3种覆被类型中最高。浮沙地土壤水分对降水响应敏感,降水后浅层(0—10 cm)土壤含水量迅速攀升,至多能够由2%升至16%,但回落也较快,导致50 cm以上土层土壤水分连续性较差,这是由于浮沙地中植物较少,蒸腾作用相对较弱,土壤水分主要消耗于无降水时的土壤蒸发和向深层土壤下渗;由于浮沙地结构松散,保水性差,又几乎无植物根系影响,水分下渗速度较快,土壤水分在垂直剖面由上至下(0—250 mm)基本呈现为增长型动态。天然草地全剖面土壤含水量低于柠条林地和浮沙地,受降水量影响大,2015年在60—200 cm土层出现大面积干层,土壤含水量仅为3%~6%,在2016年和2017年较大降水量的补充下,土壤干层状况才得以改善,提升至8%~10%,且在该深度土层上,土壤水分连续性不如其他2种覆被类型。天然草地植被覆盖度较高,冠层截留部分雨水,使土壤水分对降水响应较为迟缓,加之植物蒸散发和根系消耗,导致天然草地土壤水分较低,尤其在草本植物根系较为集中的20 cm土层,土壤水分常年处于4%以下,全剖面土壤水分的低值中心集中于该土层,从该层至40 cm土层,土壤水分随土层深度加深而增加;40—80 cm土层土壤水分随土层加深而减少;80—200 cm土层土壤水分随土层加深而增加,但增幅微弱;200—250 cm土层土壤水分也随土层加深而增加,增幅较大,为10个百分点。天然草地土壤水分在垂直剖面由上至下基本呈现为增加(0—40 cm)—减少(40—80 cm)—增加(80—250 cm)的变化。柠条林地40 cm以上土层水分在3种覆被类型中最高,土壤水分在雨后消退的过程缓慢,能够维持较长时间,水分连续性好;在枯水年(2015年),柠条林地80 cm以上土层土壤含水量(平均值10.2%)明显高于天然草地(平均值7.3%),可能是由于在干旱胁迫下,柠条发达的根系能够通过水力提升作用将深层土壤水分向浅层土壤输送,说明柠条林地的水分调控功能优于天然草地,反映柠条林地的水分恢复力好于天然草地;柠条林地0—40 cm土层土壤水分随土层深度加深而增加,40—100 cm土层土壤水分随土层加

深而减少,100—250 cm土层土壤水分随土层加深而增加,其中200—250 cm水分增幅较大,在5.5个百分点左右。垂直剖面基本呈现为增加(0—40 mm)—减少(40—100)—增加(100—250 mm)的趋势。

土壤水分消耗和补充具有一定的季节性。3种覆被类型0—100 cm土壤水分年内变化基本经历由少至多2次交替,每年4月和9月左右是土壤水分含量的高值中心(13%~17%),具体时间因降水而略有不同;土壤水分低值中心出现在1月底至2月初和6—7月,土壤含水量最低在2%以下。3种覆被类型土壤水分变化大致可分为4个阶段:(1)土壤水分稳定期(12月至翌年2月)。正值冬季,气温低,降水事件少,土壤冻结,蒸发量小,植物与土壤水作用微弱,土壤含水量低,但较为稳定。(2)土壤水分积累期(3—5月)。气温回升,降水较上一时期多,由于土壤融冻和当季降水的入渗,土壤含水量增加。(3)土壤水分消退期(6—8月中旬)。气温高,处于生长旺盛期的植物蒸腾和地表蒸发作用强,土壤水分的消耗大于降水的补充,导致土壤水分亏缺。(4)土壤水分恢复期(8月下旬至11月)。气温逐渐下降,降水集中,单次降水量较大,降水入渗的深度较大,植物生长减缓,根系耗水和叶面蒸腾减小,土壤含水量回升。2015年9月总降水量为87.2 mm,降水量较大且分布密集,降水可在短期内下渗至较深土层,大幅提高了土壤含水量,加之秋冬季节降水的累积,天然草地中断了130 cm以上土层连续的干层,柠条林地和浮沙地在80 cm以上土层的土壤含水量直到12月都维持在较高水平,土壤平均含水量分别为10.8%,10.6%。2016年该时期的降水能使天然草地20—80 cm土层土壤水分提高至9.3%左右并维持至次年1月,能使柠条林地20—100 cm土层土壤水分提高至10.6%左右,且直到2017年5月底都维持在该水平,因此恢复期的降水对全年土壤水分平衡具有关键作用。

2.3 不同覆被类型土壤水分对降水事件的响应

考虑到降水对土壤水分的影响深度,本文选取0—100 cm土层分析降水前后3种覆被类型的土壤水分变化特征。由表4及图2可以看出,2.8 mm的降水(因水分变化微弱,图略),仅能对浮沙地和柠条林地0—5 cm土层土壤水分产生影响,水分增幅很小,对天然草地没有影响。在6.2,7.8 mm的小降水事件中,浮沙地对降水的响应深度和土壤水分增幅均大于天然草地和柠条林地,天然草地的响应程度最小,土壤水分增幅<27%。17.8,28.2,37.6 mm的降水均能够影响3种覆被类型0—40 cm土壤水分,但土壤

水分的增幅有差异,17.8 mm 的降水能够使 3 种覆被类型 0—10 cm 土层土壤水分增加 48%~85%;28.2 mm 的降水能使其增加 187%~567%;37.6 mm 的降水能使其增加 125%~313%;20 cm 土层,37.6 mm 的降水使浮沙地和柠条林地土壤水分分别提高 186.1%,146.8%,而天然草地仅提高 23.4%;在 40 cm 土层,天然草地和柠条林地的土壤水分增幅微弱,仅在 2.3%以下,明显小于浮沙地。68.6 mm 的降水能够影响 3 种覆被类型 0—100 cm 土层土壤水分,且对土壤深层的补给作用大,浮沙地在 80 cm 土层土壤

水分增幅最大,为 128.4%,天然草地和柠条林地 60—80 cm 土层土壤水分增幅最大,达到 183%~252%。在降水量 37.6 mm 及以下的降水事件中,3 种覆被类型土壤水分由表层至深层增幅基本上呈漏斗型,对降水响应的深度在 40 cm 土层以上,0—10 cm 土层土壤水分增幅大,随着土层加深,降水对土壤水分的影响减小;而在 68.6 mm 的降水事件中,土壤水分增幅呈现减小—增加—减小的变化趋势。总的来看,在不同降雨事件下,浮沙地土壤水分增幅最大,其次是柠条林地,天然草地土壤水分增幅最小。

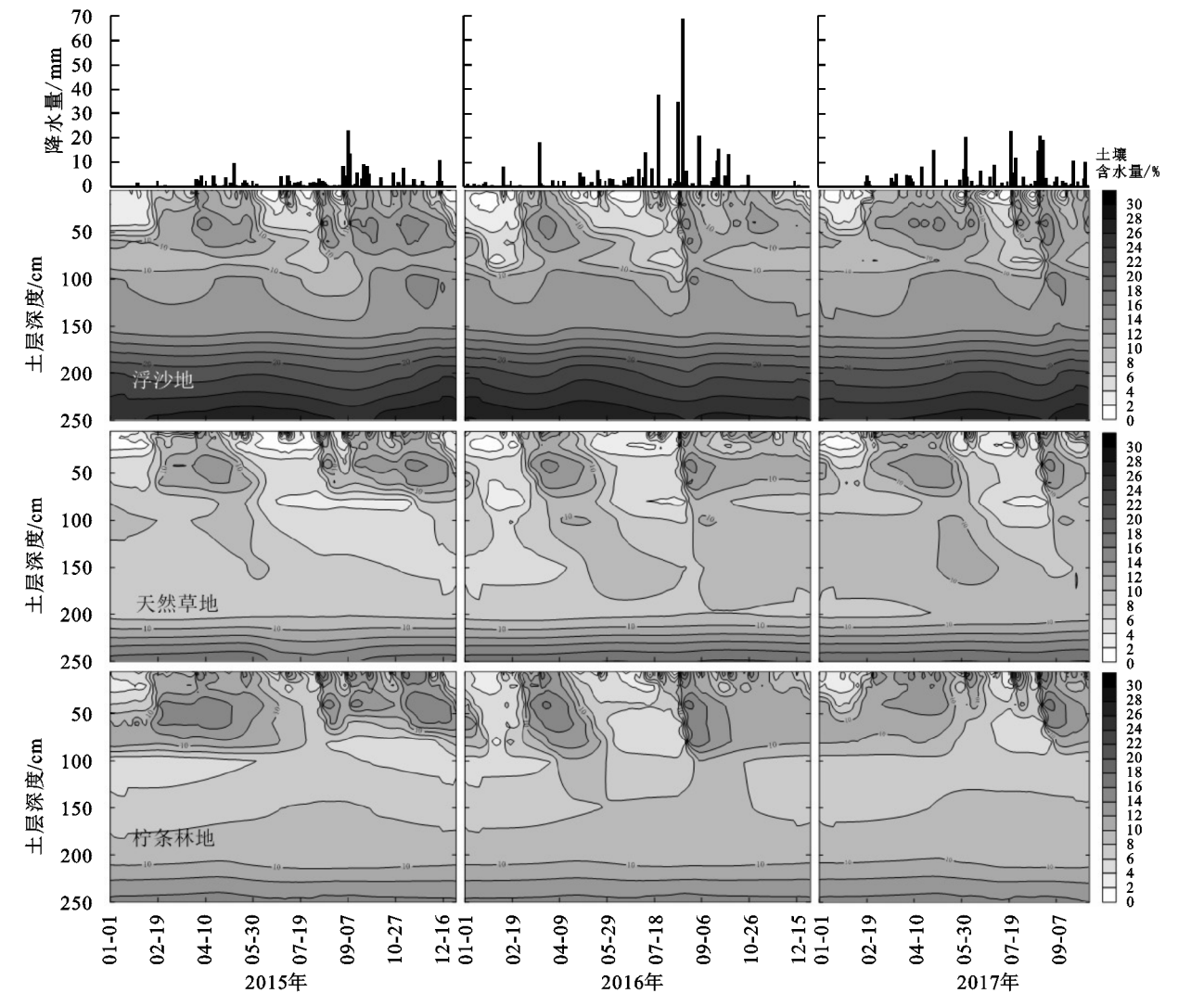


图 1 不同覆被类型土壤水分动态

2.4 不同覆被类型各土层对降水的初始响应时间

从表 5 可以看出,3 种覆被类型的土壤水分对不同降水量的初始响应时间存在差异,但均呈现随土层加深响应时间逐步变长的规律,体现出土壤水分入渗的先后过程。在同一降水事件下,浮沙地土壤水分的响应速度总体最快,其次是柠条林地,天然草地响应最慢。3 种覆被类型均对 68.6 mm 的降水响应最快,20 cm 以上土层响应时间在 2 h 以内,100 cm 土层响应时间差异较大,浮沙地仅需 21 h,而天然草地和柠

条林地的响应时间分别为 109,150 h。3 种覆被类型表层土壤水分对降水的响应时间差异也较大,浮沙地、天然草地和柠条林地 0—5 cm 土层的响应时间分别在 1~9,1~18,1~9.5 h,在 7.8,68.6 mm 的降水事件中,3 种覆被类型土壤表层可以快速完成响应,而在其他降水事件中,表层土壤的响应时间具有不同程度的滞后,原因是这些降水事件在降水初期,降水量微小,降水强度较低,对土壤水分基本没有影响,随着降水量的累积,土壤水分才开始对降水有所响应。

表 4 不同降水事件下不同覆被类型土壤水分增幅

覆被 类型	土层 深度/cm	土壤水分增幅/%						
		2.8 mm	6.2 mm	7.8 mm	17.8 mm	28.2 mm	37.6 mm	68.6 mm
浮沙地	5	9.7	43.0	50.1	72.4	566.4	312.5	67.6
	10		80.0	46.2	77.5	469.4	198.7	75.9
	20		1.7	16.4	34.6	199.0	186.1	37.3
	40			6.8	19.6	56.1	29.2	27.9
	60							88.5
	80							128.4
	100							89.6
天然草地	5		11.1	26.9	48.0	438.1	125.8	74.0
	10		9.8	22.3	51.8	401.0	279.8	73.4
	20			5.1	14.3	271.8	23.4	41.3
	40				3.3	1.0	1.2	31.3
	60							183.4
	80							164.1
	100							74.7
柠条林地	5	4.5	46.5	46.2	84.1	525.9	224.1	75.8
	10		6.7	40.8	66.5	187.3	168.7	67.2
	20			9.1	25.5	135.3	146.8	36.7
	40				3.2	43.1	2.3	20.6
	60							199.1
	80							251.5
	100							62.2

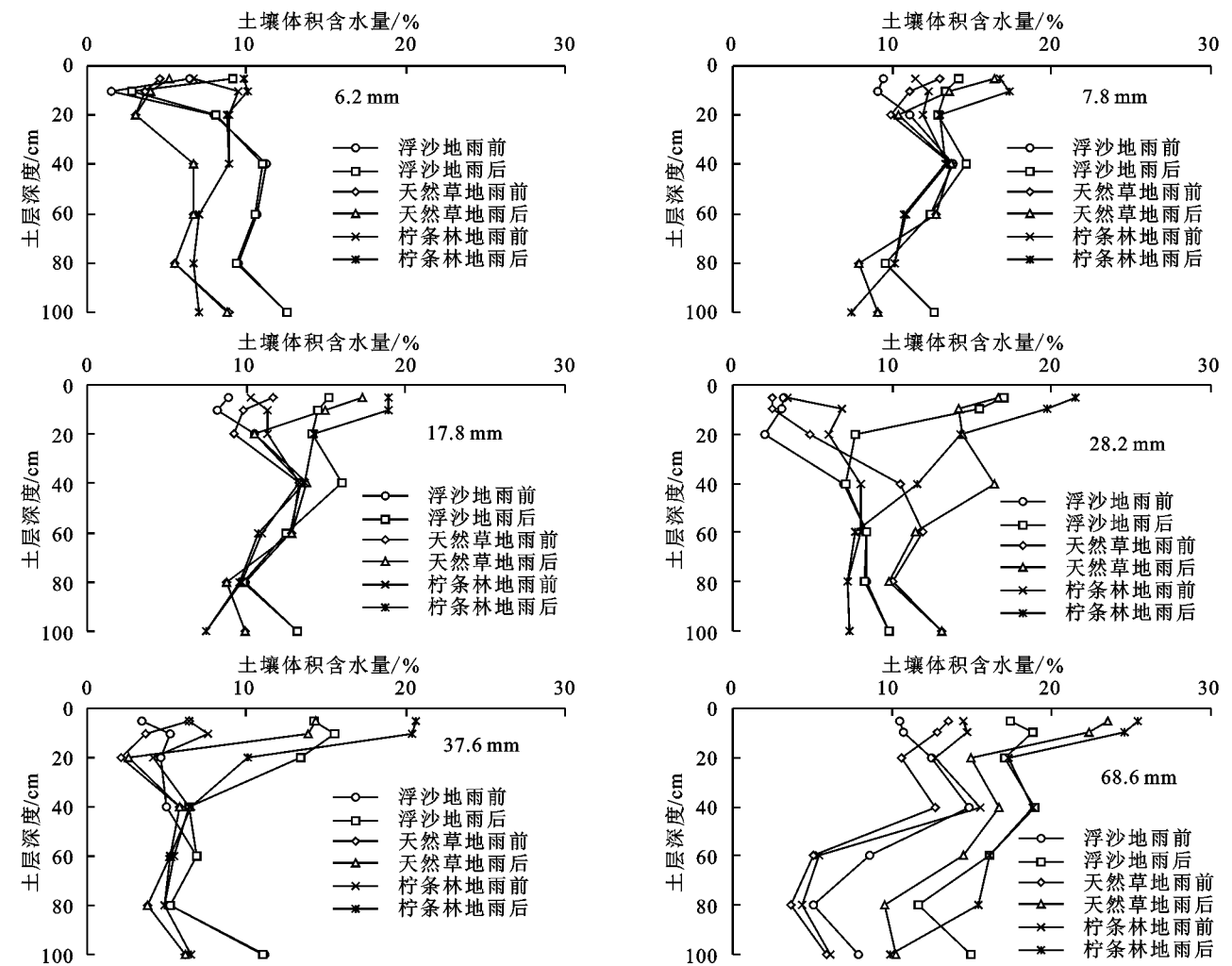


图 2 不同降水事件前后不同覆被类型土壤水分增幅

表 5 不同覆被类型对不同降水事件的初始响应时间

覆被 类型	土层 深度/cm	初始响应时间/h						
		2.8 mm	6.2 mm	7.8 mm	17.8 mm	28.2 mm	37.6 mm	68.6 mm
浮沙地	5	4.0	3.0	1.0	3.5	9.0	4.0	1.0
	10		4.0	1.5	3.5	10.0	4.0	1.0
	20		5.5	3.5	7.0	18.0	5.0	1.0
	40			11.0	14.0	32.0	60.0	3.0
	60							3.0
	80							15.0
	100							21.0
天然草地	5		5.5	1.0	6.5	18.0	8.0	2.0
	10		6.0	3.5	8.0	18.5	9.0	2.0
	20			14.0	24.0	44.5	62.0	2.0
	40				52.0	55.0	162.0	3.0
	60							3.0
	80							34.0
	100							109.0
柠条林地	5	4.0	4.5	1.0	3.0	9.5	4.0	1.0
	10		5.0	1.5	3.5	12.0	5.0	1.0
	20			7.5	10.5	24.5	20.0	1.0
	40				78.0	80.0	163.0	5.0
	60							9.0
	80							31.0
	100							150.0

3 讨论

3.1 不同覆被类型对降水的响应

研究区土壤水分在降水补给、土壤蒸发和植物蒸腾等因素共同作用下,年内变化具有波动性,总体上看,土壤水分的动态变化与降水的变化基本一致,其中 100 cm 以上土层的土壤水分受降水影响波动较大。土壤水分的季节变化大致分为稳定期(12 月至翌年 2 月)、积累期(3—5 月)、消退期(6—8 月中旬)和恢复期(8 月下旬至 11 月)4 个时期。稳定期基本无降水、土壤表层冻结、水分散失微弱,土壤含水量较低且稳定;积累期通过冻融、凝结等过程使水分得到一定补充,土壤含水量有所提升;消退期由于气温上升、植物返青、蒸发蒸腾增强,土壤水分的消耗大于降雨的补充,水分亏缺,天然草地水分消耗量大于柠条林地,可能是由于其对土壤水分的调节和蓄持能力不如柠条林地;自恢复期开始,秋季降水增大,植物蒸腾和地表蒸发作用减弱,土壤水分贮量增加并能够维持较长时间。土壤水分年内变化与宋乃平等^[19]研究规律基本一致。

土壤水分对降水的响应程度不仅受降水事件大小影响,降水强度、干旱期长短、植被类型和土壤质地也是重要的影响因素^[20]。本研究结果中,28.2,37.6 mm 的降水事件都能影响 3 种覆被类型 40 cm 以上土层土壤含水量,但对土壤水分补给量有差异,在浮

沙地、天然草地和柠条林地前者的补给量分别为后者的 1.3,1.7,1.3 倍,且在 20,40 cm 土层差异更明显。这可能是由于降水强度不同造成,28.2 mm 降水历时长,降水强度低,通过查阅降水资料可知,开始降水的 18 h 内,每小时雨量均不超过 1.5 mm;37.6 mm 降水历时短,降水强度高,最大雨强达 17.78 mm/h。表层土壤水分在高强度降水初期表现为跳跃式增长,短时间内达到饱和,能够容纳水分的孔隙度减少,不断增加的降水则会转变为地表径流或壤中流,形成超渗产流现象,降低对深层土壤水分的补给效能^[14]。雨前土壤含水量的高低反映出干旱期的长短,也是降水事件间隔期的长短,本研究中,17.8 mm 的降水同样能影响浮沙地、天然草地和柠条林地 40 cm 以上土层的土壤水分,雨前土壤含水量分别为 10.2%,11.0%和 11.6%,远高于 28.2,37.6 mm 降水事件中 4%~6%左右的雨前含水量。但该次降水事件对土壤水分的补给量不如其他 2 次降水,表明雨前土壤含水量越高,雨水的下渗深度越大,雨前土壤含水量越低,降水对土壤水分的补给量越大,这是由于上层土壤含水量越高,水分入渗锋面与下层干旱土层的平均土水势梯度越大,产生的入渗通量增大,加速了水分向下运移^[13];而雨前土壤含水量越低,土壤水分增加的空间也相对越大,这与陈敏玲等^[20]在内蒙古半干旱草原研究的结论一致。

土壤物理性质能够影响土壤水分的人渗能力。

郭柯等^[21]研究表明,由于固定浮沙地地表细土粉粒和黏粒的含量较高,结构较为密实,渗透性减小,毛管力和持水力强,当降水量为5 mm时,雨水在固定浮沙地仅能下渗到5 cm土层,而在土粒粗大、质地疏松的流动浮沙地可下渗到20 cm。本研究中,3种覆被类型100 cm以内土壤剖面的平均容重由大到小依次为浮沙地(1.7 g/cm^3)>天然草地(1.62 g/cm^3)>柠条林地(1.61 g/cm^3),毛管孔隙度由大到小依次为柠条林地(37.43%)>天然草地(36.53%)>浮沙地(32.85%),饱和含水率由大到小依次为柠条林地(23.85%)>天然草地(22.90%)>浮沙地(19.94%),黏粉粒含量由多到少依次为柠条林地(16.03%)>天然草地(15.60%)>浮沙地(12.71%),一般研究^[22]表明,土壤黏粒含量越高,持水能力越强,而随含砂量增加,土壤容重、非毛管孔隙度增加,总孔隙度与毛管孔隙度减少,持水量减少,柠条林地和天然草地的土壤物理性质提高了其土壤持水能力,对降水的蓄集和保持能力增加;浮沙地土壤孔隙结构差,毛管孔隙度低,粗砂粒含量显著高于天然草地和柠条林地($P < 0.05$),土粒间的孔隙直径较大,不利于水分的维持,浮沙地土壤水分主要通过土粒间的大孔隙向下渗漏,这与赵景波等^[23]研究结果一致。因此,在同一降水事件中,水分往往在浮沙地下渗更快更深,且对小降水的响应更敏感,6.2,7.8 mm的降水事件中,水分在浮沙地中的下渗深度均大于天然草地和柠条林地。降水时,水分需要克服蒸发消耗和林冠截留等才能入渗至深层土壤,对土壤水分形成有效补给。天然草地对降水的响应程度低于柠条林地,原因可能是柠条树皮光滑,植株冠层内空隙较大,被截留的雨水少^[10],且在植物主干周围,根道优先流以及土壤大孔隙的存在能够促进树干茎流水向土壤深层补给,柠条根系分布有利于树干茎流水向更深层的土壤入渗;而在天然草地,草地根系、枯枝落叶层和生物土壤结皮等构成的疏水性有机物会产生土壤斥水性,土壤斥水性会降低土壤入渗率及土壤贮水量^[24],且天然草地的植被覆盖度较柠条林地高,故植被对雨水的截留相对较多。有研究^[24]表明,在干旱区,与灌木相比,草地单位冠层投影面积降水截流量较高,穿透雨速率和冠层排水速率较低,可能是由于草地单位空间上生物量密度较大造成。本研究中,2.8 mm的降水并不能引起天然草地土壤水分增加,浮沙地和柠条林地的土壤水分增幅也十分微弱,仅能轻微湿润土壤表层(0—5 cm),对土壤水分不能产生有效补给。>6.2 mm的降水才开始提高3种覆被类型10 cm以上土层土壤水分。

3.2 降水格局变化对植被生长的影响

本研究区内,<10 mm的降水事件占全部降水

事件的83.0%,但降水量仅占全部降水量的34.7%,<25 mm的降水事件占到95.0%,25 mm以上的降水事件仅占5.0%,呈现出小降水事件占主导、大降水事件对降水总量贡献大的降水格局。土壤水分对降水的响应过程中,存在着滞后现象以及响应阈值,降水特征、地表植被覆盖和土壤物理性质等因素综合影响植被覆盖条件下土壤水分对降水的响应^[25]。Gao等^[26]在北美荒漠区的研究表明,<10 mm的降水事件主要促进草本植物生长发育,较大的降水事件则有利于灌木的定植。研究区<10 mm的降水对浮沙地20 cm以上土层土壤水分的补给较为明显,对柠条林地和天然草地10 cm以上土层土壤水分补给明显,这样的降水格局利于浅根系草本植物生长,而深层土壤水分得不到降水的有效补给,深根型植物易受到水分胁迫。据大气环流模型预测,未来全球降水格局会发生重大改变,中高纬度地区的极端降水事件将会增多,干旱区将形成单次降水量增加、干旱间期延长的降水格局^[1]。我国每10年干旱天数增加3.78%,特大暴雨次数增加1.51%,小雨和中雨次数分别减少1.25%和1.14%^[27]。土壤水分由浅层至深层再分布的过程有利于增强深根植物的耐旱能力,同时降低浅根植物对水分的竞争^[28]。植物根系的空间分布及生理生态学特征与对不同深度土壤水分的利用有关,是对环境长期适应的结果,研究区中柠条林地的根系主要分布在100—300 cm土层,当降水格局改变,大降水乃至极端降水增加,能够使水分向更深土层渗透,有效降低蒸发损失,延长土壤有效水的供给时间^[29],因此将会提高柠条在群落中的优势。在未来小雨和中雨事件减少的情况下,干旱期延长,天然草地中,浅根系的猪毛蒿等一、二年生草本居多,易受到土壤表层干旱的抑制,且即使生长季中有了一次能使种子萌发的降水,之后较长时间的干旱期也可能使土壤中无足够的水分维持一年生植物完成生活史^[30]。因此,荒漠草原区在未来降水格局下,更有利于深根型灌木的生长。

4 结论

(1)荒漠草原土壤水分可以分为0—20 cm极活跃层、20—40 cm强活跃层、40—100 cm活跃层和100—250 cm稳定层,上面3个活跃层的土壤水分分别对Ⅲ和Ⅳ级的中等降水事件、Ⅴ级大降水事件以及68 mm以上特大降水事件有响应。总体来说,3种覆被类型土壤水分在强烈波动中也呈现一定的季节性,大致分为土壤水分稳定期(12月至翌年2月)、土壤水分积累期(3—5月)、土壤水分消退期(6—8月中旬)和土壤水分恢复期(8月下旬至11月)。

(2)土壤类型是决定土壤水分动态的重要因素,

风沙土与灰钙土的水分过程、含水量和剖面分布很不相同。风沙土在土壤剖面上的土壤含水量大于灰钙土,由表层至深层为增长趋势,灰钙土为增加—减少—增加的趋势。植被对土壤剖面水分具有再分配的作用,植被不是被动地接受土壤水分,而是对土壤水分具有再调节作用,这在干旱区生态系统中尤为重要,决定了植被类型与土壤类型的对应关系。

(3) <5 mm 的降水对浮沙地和柠条林地 0—5 cm 土层仅能起到微弱的湿润作用,对天然草地没有影响,在本研究区不能有效补充土壤水分;中等降水事件(5~25 mm)和大降水事件(25~40 mm)对 0—20 cm 或浮沙地 0—40 cm 土层土壤水分有补给作用,大降水对土壤水分的补给量更大;40—100 cm 土层的水分补充则需要特大降水事件。浮沙地对降水响应最敏感,柠条林地次之,天然草地最滞后。

参考文献:

- [1] 陈军,王玉辉.1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局[J].生态学报,2012,32(22):6925-6935.
- [2] 赵文智,刘鹄.干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):243-249.
- [3] 邱扬,傅伯杰,王军,等.土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2007,26(1):100-107.
- [4] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, et al. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: Climatology and ecohydrology of the western USA[J].Oecologia,2004,141(2):269-281.
- [5] Yahdjian L, Sala O E. Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the Patagonian steppe[J].Ecology,2006,87(4):952-962.
- [6] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶.生态水文过程研究进展[J].生态学报,2003,23(3):580-587.
- [7] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, et al. Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: Precipitation pulses, soil water, and plant responses[J].Oecologia,2004,141(2):194-210.
- [8] Ribolzi O, Hermida M, Karambiri H, et al. Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso[J].Catena,2006,67(3):145-154.
- [9] 李衍青,孙英杰,张铜会,等.小叶锦鸡儿灌丛下土壤水分对降水的响应[J].生态学杂志,2013,32(5):1097-1103.
- [10] 王正宁,王新平,刘博.荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配[J].应用生态学报,2016,27(3):755-760.
- [11] Berndtsson R, Chen H. Variability of soil water content along a transect in a desert area[J].Arid Environment,1994,27(2):127-139.
- [12] 邹慧,高光耀,朱斌,等.黄土高原恢复草地土壤水分对降水响应及模拟[J].干旱区研究,2020,37(4):890-898.
- [13] 王新平,康尔泗,李新荣,等.荒漠地区土壤初始状况对水平入渗的影响[J].地球科学进展,2003,18(4):592-596.
- [14] 王博,段玉玺,王伟峰,等.油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J].应用生态学报,2020,31(5):1571-1578.
- [15] 刘冰,赵文智,常学向,等.黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J].中国沙漠,2011,31(3):716-722.
- [16] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报,2004,35(4):48-53.
- [17] 魏雅芬,郭柯,陈吉泉.降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J].植物生态学报,2008,32(6):1346-1355.
- [18] 常昌明,牛建明,王海,等.小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应[J].干旱区研究,2016,33(2):206-265.
- [19] 宋乃平,杨明秀,王磊,等.荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化[J].生态学杂志,2014,33(10):2618-2624.
- [20] 陈敏玲,张兵伟,任婷婷,等.内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(7):658-668.
- [21] 郭柯,董学军,刘志茂.毛乌素浮沙地沙丘土壤含水量特点:兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J].植物生态学报,2000,24(3):275-279.
- [22] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.
- [23] 赵景波,陈颖,曹军骥,等.青海湖西北部土壤入渗规律研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(3):90-96.
- [24] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草原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.
- [25] 赵娜娜,于福亮,李传哲,等.降水入渗及土壤水分变化对产流过程影响研究进展[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):111-115.
- [26] Gao Q, Reynolds J F. Historical shrub-grass transitions in the northern Chihuahuan Desert: Modeling the effects of shifting rainfall seasonality and event size over a landscape gradient[J].Global Change Biology,2003,9(10):1475-1493.
- [27] Ma S M, Zhou T J, Dai A G, et al. Observed changes in the distributions of daily precipitation frequency and amount over China from 1960 to 2013[J].Journal of Climate,2015,28(17):6960-6978.
- [28] Ryel R J, Leffler A J, Peek M S, et al. Water conservation in *Artemisia tridentata* through redistribution of precipitation[J].Oecologia,2004,141(2):335-345.
- [29] 张彬,朱建军,刘华民,等.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J].植物生态学报,2014,38(9):1008-1018.
- [30] 张景光,王新平,李新荣,等.荒漠植物生活史对策研究进展与展望[J].中国沙漠,2005,25(3):306-314.