

呼伦贝尔典型草原三种植物群落土壤凝结水比较

佳依山¹, 多立安¹, 郑志荣², 叶生星², 刁兆岩³, 吕世海²

(1. 天津师范大学 生命科学学院, 天津 300387; 2. 中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 北京林业大学 草地生态与资源研究中心, 北京 100083)

摘要: [目的] 分析呼伦贝尔地区不同植物群落产生的土壤凝结水量, 为当地沙化草地植被恢复中合理有效利用水资源提供依据。[方法] 通过称重法测定 3 种植物群落茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和羊草(*Leymus chinensis*)土壤凝结水形成的时间、数量和月动态变化, 比较植被类型和环境因子对土壤的影响。[结果] (1) 3 种植物群落内土壤凝结水的形成趋势基本一致, 即每天 18:00 以后逐渐形成, 至次日 6:00 结束。土壤凝结水夜间动态呈双峰型, 其中第 1 个峰值出现在 20:00 左右, 第 2 个峰值出现在 4:00 左右。(2) 3 种植物群落日均凝结量具有显著差异($p < 0.05$), 茵陈蒿样地、糙隐子草和羊草样地的日均凝结量分别为 7 月 0.28, 0.22, 0.32 mm, 8 月 0.50, 0.35, 0.69 mm, 9 月 0.28, 0.23, 0.37 mm。(3) 土壤凝结水在土壤不同深度的凝结量大小依次为 0—5 cm > 20—25 cm > 5—10 cm > 10—15 cm > 15—20 cm, 其中 0—5 cm 的凝结量羊草样地的最多为 0.147 mm, 其次为茵陈蒿样地 0.125 mm, 最后是糙隐子草样地 0.094 mm。[结论] 土壤凝结水来源主要有 2 个, 植被类型的不同导致这两种来源对总量的贡献比例不同, 其中羊草植物群落能够形成更多的土壤凝结水, 在草原植被恢复中能够起到更积极的作用。

关键词: 呼伦贝尔草原; 植物群落; 土壤凝结水; 环境因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0114-06

中图分类号: S812.2

文献参数: 佳依山, 多立安, 郑志荣, 等. 呼伦贝尔典型草原三种植物群落土壤凝结水比较[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 114-119. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.021

Comparative Study on Soil Condensation Water in Three Plant Communities in Hulunbeier Grassland

JIA Yishan¹, DUO Lian¹, ZHENG Zhirong², YE Shengxing², DIAO Zhaoyan³, LYU Shihai²

(1. College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

3. Center of Grassland Ecology and Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To analyze the soil condensation water in three plant communities in Hulunbeier grassland in order to provide basis for the effective utilization of water resource in restoration of grassland vegetation in desertified land. [Methods] Three plant communities, *Artemisia capillaris*, *Cleistogenes squarrosa* and *Leymus chinensis* were selected to measure the formation time and amount of soil condensation water as well as their dynamic changes by weighing method and the effects of vegetation type, and environmental factors were analyzed on the formation of soil condensation water. [Results] (1) The soil condensation water began to form 18:00 and began to evaporate after 6:00. Soil condensation water dynamic changes showed bimodal pattern, one of the first peak appeared at about 20:00 while the second peak appeared at about 4:00; (2) Soil condensation water amount in different plant communities showed significant differences($p < 0.05$).

收稿日期: 2014-02-15

修回日期: 2015-04-29

资助项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(201109025); 中国环境科学研究院改革启动专项(2013-YSGQ-06)

第一作者: 佳依山(1988—), 女(哈萨克族), 新疆维吾尔自治区塔城市人, 硕士研究生, 研究方向为植物生理生态。E-mail: jaisan@126.com。

通讯作者: 吕世海(1963—), 男(汉族), 内蒙古自治区化德县人, 研究员, 博士, 主要从事区域生态保护研究。E-mail: lv_sh@ craes.org.cn。

From July to September, the daily mean amount of condensation water in the three plots, *A. capillaries*, *C. squarrosa* and *L. chinensis*, was 0.28 mm, 0.22 mm and 0.32 mm, respectively in July, 0.50 mm, 0.35 mm and 0.69 mm in August, and 0.28 mm, 0.23 mm and 0.37 mm in September; (3) Soil condensation water in different depth of soil follows as an order as 0—5 cm > 20—25 cm > 5—10 cm > 10—15 cm > 15—20 cm, the amount of condensation water in 0—5 cm layer in *L. chinensis* plot was up to 0.147 mm, followed by the *A. capillaries* plot (0.125 mm) and *C. squarrosa* plot (0.094 mm). [Conclusion] There was two sources of soil condensation water. Different types of plant communities result in the different contributions of these two sources to the total amount of soil condensation water. *L. chinensis* can form more soil condensation water, which may play a more important role in restoration of grassland.

Keywords: Hulunbeier grassland; plant communities; soil condensation water; environmental factors

呼伦贝尔草原隶属中国北方干旱半干旱区, 根据研究报告 1951 年以来, 呼伦贝尔草原气温增幅达 1.6 °C, 温度的升高加大了地表水分的蒸腾和蒸发散失, 减弱了天然降水对流域产水量的贡献, 区域效应加剧, 干旱化已经成为当地不容忽视的生态问题^[1]。在干旱区水分是制约植被生长发育的关键因子, 相对于降雨, 土壤凝结水是持续的、长期的、稳定的水分来源^[2], 并且能够被植被直接吸收和利用, 对植物生长繁育具有重要意义^[3]。土壤凝结水不仅可以润湿荒漠中的植物^[4], 有助于土壤生物结皮^[5], 改善一年生荒漠植物的水分关系和净光合速率^[6], 增加生物量^[7], 而且凝结在植物冠层的凝结水有助于植物克服干旱胁迫^[8], 同时, 凝结水对减少土壤蒸发损失起到重要补偿作用^[9]。作为干旱区水分来源的重要组成部分, 土壤凝结水的研究得到了广泛关注, 国内对凝结水的研究集中在干旱半干旱地区不同生境不同下垫面对凝结量的影响^[10-11], 近年来相关研究的范围逐步从干旱地区向其他地区扩展。土壤凝结水的研究方法有微渗仪法^[12-13]、人造凝结面法^[14-15]、称重法^[16]等, 国内对凝结水的研究提到环境条件中气象因子是对凝结水形成量影响最大的关键因子, 也有文献提出植被覆盖度和植被类型对凝结水的影响, 但研究较少, 尤其在呼伦贝尔地区常见的植物群落对凝结水的影响研究甚少。因此, 本文拟在呼伦贝尔地区开展对不同植物群落对凝结水的影响, 研究凝结水的数量及其形成过程和变化规律具有重要的生态意义, 为当地

沙化草地植被恢复中合理有效利用水资源提供基础科学试验依据。

1 研究区概况

研究区位于鄂温克自治旗的辉河国家级自然保护区试验区内, 地理坐标为 48°10′50″—48°57′00″N, 118°48′—119°45′E, 平均海拔为 800~1 000 m, 总面积为 3 468.48 km²。气候属中温带大陆性季风气候, 冬季漫长寒冷, 夏季湿润短促, 年均气温为 -2.4~2.2 °C, 年均降水量为 300~350 mm, 70% 的降水集中在 6—8 月, 无霜期为 100~120 d。地带性土壤类型为黑钙土和栗钙土, 由于受区域内地貌、水文和地质的影响, 发育有隐域性草甸沼泽土、盐化草甸土和风沙土等^[13]。植物种类包括茵陈蒿、糙隐子草、羊草、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)、麻花头 (*Serratula centauroides*)、二裂叶委陵菜 (*Potentilla bifurca*)、大针茅 (*Stipa grandis*) 等。

2 材料与方 法

2.1 样地设置

选择研究区内 3 种优势植物群落——茵陈蒿植物群落 (100 m × 80 m)、糙隐子草植物群落 (50 m × 50 m) 和羊草植物群落 (80 m × 120 m) 生长地为研究对象, 从 2013 年 7 月 18 日至 9 月 19 日, 开展不同植物群落对凝结水形成量影响研究。样地植被类型见表 1。

表 1 研究区特征

植物群落	样地植被类型	样地特征
茵陈蒿	半灌木草本	低山坡, 地面总覆盖度 88%, 群落平均高度 27.9 cm, 伴生种主要有糙隐子草、羊草、星毛委陵菜、麻花头、二裂叶委陵菜等
糙隐子草	多年生草本	开阔平原, 地面总覆盖度 89%, 群落平均高度 9.7 cm, 伴生种主要有星毛委陵菜、麻花头、冷蒿 (<i>Artemisia frigida</i>)、羊草、二裂叶委陵菜、花苜蓿 (<i>Melilotoides ruthenica</i>) 等
羊草	多年生草本	低山丘陵, 地面总覆盖度 92%, 群落平均高度 59.9 cm, 伴生种主要有星毛委陵菜、糙隐子草、委陵菜 (<i>Potentillae chinensis</i>)、麻花头、茵陈蒿、大针茅等

2.2 试验方法和试验器材

测量装置参考刘新平等^[11]、方静等^[4]的方法,采用自制的尼龙纱网封底装置,高 5 cm,直径 20 cm,底端是 200 mm 尼龙纱,以便载土圆环中放置的土壤中水蒸气的传输。为测定不同土壤深度凝结水量,叠加了 5 层,对应土壤的 0—5,5—10,10—15,15—20,20—25 cm 深度,总高度为 25 cm。另外在测定凝结水的来源时,对筛子的最低端一层进行塑料封底处理隔绝空气流通。塑料封底装置隔断下方来自土壤深处的水汽,只能采集到来自大气的水汽,而纱网封底装置水汽来源既有大气又有土壤。具体试验过程如下:在样地内选取植被长势均匀的区域,取出 25 cm 深直径 20 cm 原状土,分层放入载土圆环中并放回原处。载土圆环第一层中放置的土与周围地面齐平,每个样地设 3 个重复,18:00 以前将装置放进去。为避免降雨对试验数据的影响,日动态监测选择晴朗的天气进行测定。一天的凝结水总量根据当日傍晚的重量与次日清晨重量之差再由公式转换获得。夜间动态变化测定从前一天 18:00 开始,每间隔 2 h 测定载土圆环的质量变化再放回,到第二天 8:00 结束。每一层载土圆环中土壤凝结水形成量的计算公式如下:

$$h = m / \pi \rho r^2$$

式中: h ——凝结水量(mm); m ——沙土质量的变化(g); r ——圆柱筒半径(mm); ρ ——水密度(g/mm^3),取 $1.0 \text{ g}/\text{mm}^3$ 。

同步观测 3 个样地近地层相对湿度、露点、气温、

风速(Kestrel 4500 手持气象站)土壤地下 5,10,15,20 cm 深度温度变化(曲管地温计)。

2.3 数据处理

在对原始数据进行公式换算后,凝结水日均凝结量以及差异程度采用均值、单因素方差分析(ANOVA)通过 SPSS 软件完成,应用 Microsoft Excel 2007 绘图。

3 结果与分析

3.1 凝结水的水汽来源

3 种植物群落样地纱网封底装置收集到的凝结水总量多于塑料封底装置收集到的凝结水。对试验数据进行均值和方差分析获得结果如图 1 所示。18:00—20:00 塑料封底和纱网封底装置质量均增加,凝结水逐渐形成,且两者具有相似的变化趋势。整体上塑料封底与纱网封底装置在 18:00—22:00 时间段凝结量较多,凝结量在 $0.026 \sim 0.038$ 和 $0.072 \sim 0.129 \text{ mm}$ 之间,2:00—4:00 再次达到增长高峰,凝结量在 $0.026 \sim 0.037$ 和 $0.044 \sim 0.087 \text{ mm}$ 之间,之后缓慢增长,直至 6:00 凝结作用减弱,8:00 以后夜间凝结的水再缓慢蒸发完毕。3 个样地塑料封底装置收集到的凝结水总量分别是茵陈蒿样地为 0.154 mm ,糙隐子草样地为 0.138 mm ,羊草样地为 0.127 mm ,纱网封底装置收集到的凝结水总量依次是 0.364 , 0.235 , 0.382 mm ,前者占后者的 42.2%,58.6% 和 33.2%。

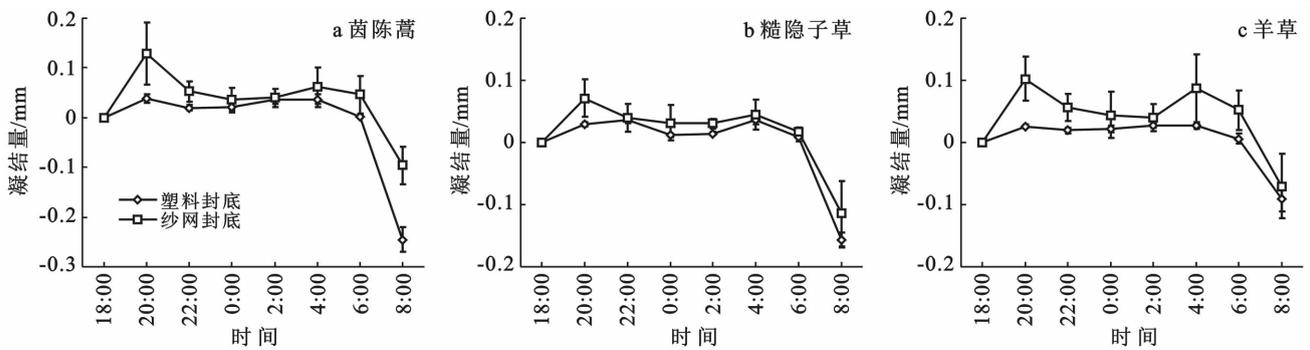


图 1 不同植物群落凝结水来源

3.2 土壤凝结水夜间动态变化

如图 2 所示,土壤凝结水夜间动态变化特征呈双峰曲线,3 个样地土壤凝结水 20:00 出现第 1 个峰值,到了次日凌晨 4:00 出现第 2 个峰值,此时因气温最低,相对湿度最大,凝结水形成量较大,但已没有最初的凝结量多。植被条件较好的羊草样地的凝结量大于其他两地,3 个样地中茵陈蒿样地凝结水量变化幅度较大,最初形成量最多,为 0.037 mm 。糙隐子草样

地变化较平稳,变化范围在 $0.014 \sim 0.101 \text{ mm}$ 。茵陈蒿样地与糙隐子草样地在 6:00 之后蒸发减重,羊草样地在 4:00 形成量最多为 0.170 mm ,并且凝结作用持续到 8:00。

气象站 24 h 监测数据显示(图 3),18:00 时气温已开始下降,到了 20:00 这 3 个样地大气相对湿度值接近的条件下,茵陈蒿样地降温幅度最大为 $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$,其次是羊草样地为 $6.2 \text{ }^\circ\text{C}$,最后是糙隐子草样地

6.0℃。整体上 3 个样地中最高温度和最低温度均出现在羊草样地,分别为 32.6 和 14.2℃,比茵陈蒿样地和糙隐子草样地最高温分别高出 2.0 和 2.5℃,最低温度低 0.8 和 0.2℃。羊草样地日较差值最大,为 18.4℃,茵陈蒿样地和糙隐子草样地分别为 15.6 和 15.3℃。一天 24 h 相对湿度平均值从茵陈蒿样地到羊草样地依次为 80.2%,79.6%和 83.8%。

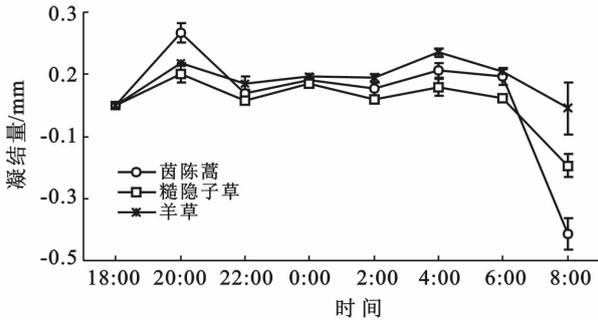


图 2 不同植物群落表层土壤凝结水量的日变化

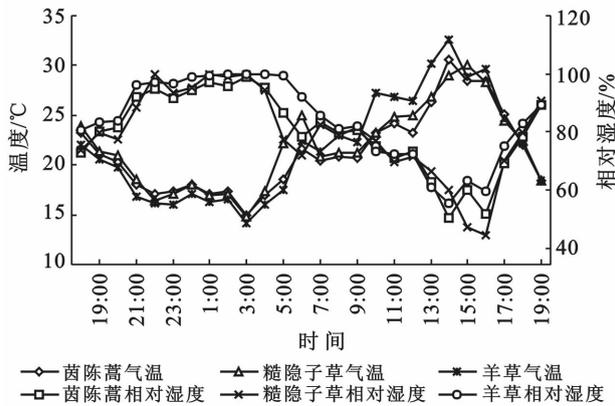


图 3 研究区不同植物群落气温、相对湿度随时间的变化

3.3 土壤凝结水垂直变化

3 种植物群落 0—25 cm 土层均有凝结水形成,最大凝结量在 0—5 cm 土层,20—25 cm 土层其次,其中羊草样地 0—5 cm 层凝结量最多。图 4 可以看出茵陈蒿样地 0—5 cm 土层凝结量为 0.125 mm 占总凝结水量的 46.2%。5—10 cm 土层凝结量占总凝结水量的 12.7%,10—15 cm 土层凝结量占总凝结量的 13%,15—20 和 20—25 cm 土层分别占 12.2%和 15.9%。糙隐子草样地 0—5 cm 土层凝结量为 0.094 mm 占总凝结水量的 39.4%,5—10 cm 土层凝结量占总凝结水量的 15.5%,10—15 cm 土层凝结量占总凝结量的 14%,15—20 和 20—25 cm 土层分别占 13.4%和 17.5%。羊草样地 0—5 cm 土层凝结量为 0.147 mm 占总凝结水量的 48.2%,5—10 cm 土层凝结量占总凝结水量的 13.9%,10—15 cm 土层凝结量

占总凝结量的 12.3%,15—20 和 20—25 cm 土层分别占 10.6%和 15%。

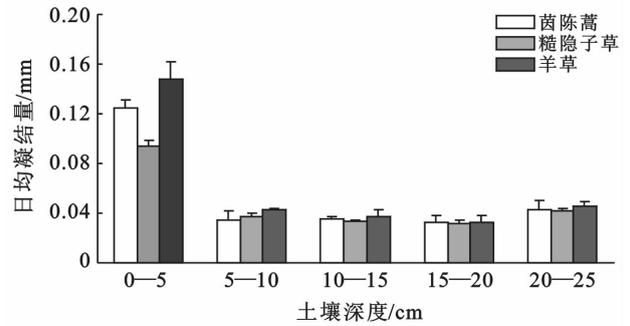


图 4 不同植物群落土壤凝结水量的垂直变化

如图 5 所示,从日均凝结量看羊草植物群落能够形成更多的土壤凝结水。方差分析显示,羊草样地与茵陈蒿样地和糙隐子草样地间存在显著差异($p < 0.05$)。羊草样地最多为 0.515 mm,其次为茵陈蒿样地,为 0.394 mm,最少的是糙隐子草样地,为 0.284 mm。

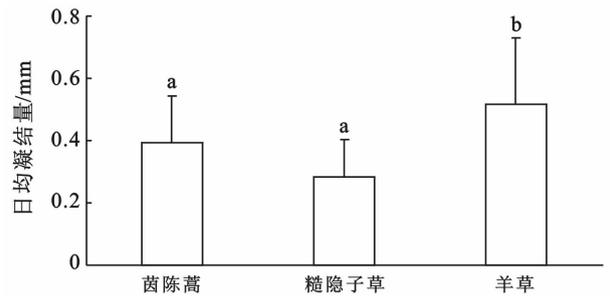


图 5 不同植物群落土壤凝结水日均凝结量 ($p < 0.05$)

3.4 土壤凝结水的月变化

试验期间各月凝结水量如表 2 所示。7—9 月,3 种植物群落中,茵陈蒿、糙隐子草和羊草的日平均凝结量 7 月分别为 0.28,0.22,0.32 mm,8 月分别为 0.50,0.35,0.69 mm,9 月分别为 0.28,0.23,0.37 mm。观测天全部测得的土壤凝结水量分别是 9.8,7.14 和 13.08 mm。从月动态看依旧是羊草样地的最多,比茵陈蒿样地多出 33.4%,比糙隐子草样地多出 45.4%。3 个样地土壤凝结水随月份的变化均呈现先强后弱的趋势,即在 8 月达到峰值后下降。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 土壤凝结水来源。土壤凝结水的水汽来源有 2 个方面:一是来源于空气中的水汽,包括近地表空气中的水汽、植物蒸腾和呼吸作用散逸的水汽、地面蒸发的水汽;二是来自于地面下某一深度以上土壤

孔隙中的水汽^[20]。植被类型的不同导致水汽的两种来源对土壤凝结水贡献量的不同。当大气中的水汽一定的条件下,高大生长茂密植物体和叶片会截留空气中大部分水汽,使得能够凝结在土壤表面的水汽减

少^[10],这可能导致了茵陈蒿样地和羊草样地中来自大气的水汽占土壤凝结水总量的比例偏小,而糙隐子草样地土壤凝结水中空气水分对土壤凝结水的贡献高达 58.6%。

表 2 环境因子月动态变化

月份	温度/ ℃	相对湿度/ %	降雨/ mm	风速 m/s	日均凝结水量/mm		
					茵陈蒿	糙隐子草	羊草
7	19.9	72	121	3.6	0.28	0.22	0.32
8	17.1 ↓	79 ↑	101.6 ↓	4.0 ↑	0.50 ↑	0.35 ↑	0.69 ↑
9	10.3 ↓	63 ↓	51.9 ↓	5.3 ↑	0.28 ↓	0.23 ↓	0.37 ↓

注: ↑代表上升, ↓代表下降。

(2) 植物群落对土壤凝结水的影响。植被类型和覆盖度直接影响凝结水在土壤中垂直变化、凝结量以及持续时间。羊草样地在地表 0~5 cm 层凝结水量占总量的 48.2%,其次是茵陈蒿样地为 46.2%,最后是糙隐子草样地为 39.4%。比较日均凝结量羊草样地比茵陈蒿样地和糙隐子草样地多出 38%~97.1%,持续时间多 2 个小时。在相对湿度接近的条件下降温幅度决定了凝结量,因此最初茵陈蒿样地凝结量最大。羊草样地最终的凝结量多是取决于羊草样地的低地形,高植被覆盖度,伴随的是表层土壤和植被的高蒸发蒸腾,到了一天的下午 4:00 以后相比较其他两个样地植物冠层以下至地表层相对湿度较高,而夜间低气温和高相对湿度更容易达到凝结点(图 3),综合因素最终影响到凝结水的持续时间和总凝结量。

(3) 环境因子对土壤凝结水的影响。土壤凝结水受到气温、相对湿度、风速影响较大^[17],地表凝结水随空气相对湿度增加而增加^[18]。呼伦贝尔林草交错带大气相对湿度对土壤凝结水的影响最大,7,8 月白天太阳辐射大,植物蒸腾、土壤蒸发作用强烈,夜晚微风在一定程度上加快暖湿空气的流动^[19],对凝结会起到一定帮助,土壤凝结水量从 7—8 月随着降雨量和空气相对湿度的增大有增多的趋势。到了 9 月降雨减少,大风天气增多,空气相对湿度低,再加上夜间大风不利于形成凝结水^[20]。环境因子中降雨对凝结水有着直接的影响^[21-22],这意味着土壤和大气的水汽均增加,一般在降雨后的第一天往后凝结水的量是依次减少的。其次是白天强烈的太阳辐射和气温变化,伴随高蒸发蒸腾。到了下午地表以降温为主的时候,植物依然在进行蒸腾作用,因此地表至植物冠层相对湿度增加,为凝结水提供了足够的水汽并且植被覆盖度越高,相对湿度越大,地表凝结水随空气相对湿度增加而增加^[13]。第三是夜间晴朗天气对凝结水的影响。

晴朗天气时气温和土壤表面温度下降较快,昼夜温差会大。但如果是多云或阴天,降温幅度会减小,相应的凝结水量会减少,甚至不会有形成。最后是土壤温度梯度。每日太阳落山后,由于地面温度的下降速率较气温下降快,此时与地表接触空气中的水汽达到饱和湿度而在地表上发生凝结作用。对于土壤内部水汽,温度梯度是孔隙中水汽运动的主要驱动力^[4]。地面温度相对于大气以及近地土壤的温度都较低,在地表面以下,水汽自下而上运移,地表以上水汽由大气往地表运移,土壤中的水汽和大气中的水汽均在浅层土壤凝结。

(4) 土壤凝结水在林草交错带的意义。夏天的凝结水比较降雨量虽小,但却是持续稳定的水资源^[23],除夜间降雨时间外每天都在发生,能在非降雨的天气暂时缓解浅层土壤白天蒸发蒸腾损失的水分,对浅根系植物尤为重要^[24]。呼伦贝尔林典型草原浅层土壤凝结水集中发生在 5—9 月,正值草原植物生长繁殖时期,也只有这段时期的凝结水能作为有效水提供植物生长的同时补给土壤蒸发损失。土壤凝结水夜间入渗到土壤中的水分可以被植物根系吸收,对于草原大部分须根、浅根系植物、一年生植物及其种子发育具有积极作用,对草原保持生物多样性以及防风固沙有着重要的生态意义。

4.2 结论

土壤凝结水来源主要有 2 个,植被类型的不同导致这 2 种来源对总量的贡献比例不同。40% 以上的凝结水集中在土壤 0—5 cm 层,其中羊草样地的最多。土壤凝结水日均凝结量羊草样地与茵陈蒿样地和糙隐子草样地间存在显著差异($p < 0.05$),并且凝结量最多,为 0.515 mm,茵陈蒿样地为 0.394 mm,糙隐子草样地为 0.284 mm。总的来说羊草植物群落能够形成更多的土壤凝结水,在草原植被恢复中能够起到更积极的作用。

观测期间由于野外条件的限制,仅选择了植物生长季比较旺盛的7—9月进行了土壤凝结水的观测,未能进行一个水文年甚至更长期的观测。另外2013年呼伦贝尔地区降雨比近几年高,属于较特殊的一年,因此这一年测到的土壤凝结水的值可能会偏高。往后的试验为了更接近真实值,可以在雨后的天气也进行连续测定,增加样本数量,不再局限于晴朗夜间。再建立模型,预测不同的天气条件下土壤凝结水的形成量,并用不同的测定方法来验证。

[参 考 文 献]

- [1] 吕世海,叶生星,郑志荣,等. 北方森林草原交错带[M]. 北京:中国环境科学出版社,2012:140-185.
- [2] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew deposition and drying in a desert system: A simple simulation model[J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42(3):211-222.
- [3] Li Xiaoyan. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 260(1):151-160.
- [4] 方静,丁永建. 荒漠绿洲边缘凝结水量及其影响因子[J]. *冰川冻土*, 2005(5):755-760.
- [5] 潘颜霞,王新平,张亚峰,等. 沙坡头地区吸湿凝结水对生物土壤结皮的生态作用[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3):653-658.
- [6] 庄艳丽,赵文智. 凝结水对温带荒漠一年生植物生态作用研究[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(4):526-532.
- [7] 庄艳丽,赵文智. 荒漠植物雾冰藜和沙米叶片对凝结水响应的模拟试验[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(5):1068-1074.
- [8] 郑玉龙,冯玉龙. 西双版纳地区附生与非附生植物叶片对雾水的吸收[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6):977-981.
- [9] 邵新民,于得胜,王蓓. 新疆乌拉泊水均衡试验场凝结水对地下水补给的观测研究[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2):7-11.
- [10] 郭斌,李卫红,郝兴明,等. 极端干旱区不同下垫面土壤凝结水试验研究[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(9):1171-1179.
- [11] 刘新平,何玉惠,赵学勇,等. 科尔沁沙地不同生境土壤凝结水的试验研究[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8):1918-1924.
- [12] 郭占荣,韩双平. 西北干旱地区凝结水试验研究[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5):623-628.
- [13] 冯起,高前兆. 半湿润沙地凝结水的初步研究[J]. *干旱区研究*, 1995, 12(3):72-77.
- [14] 路维娜. 乌鲁木齐南山凝结水试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2010.
- [15] 李洪波,白爱宁,张国盛,等. 内蒙古半干旱区臭柏冠层凝结水的形成和作用[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(11):2706-2711.
- [16] 李红寿,汪万福,张国彬,等. 极干旱地区土壤与大气水分的相互影响[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(2):183-188.
- [17] 李玉灵,朱帆,张国盛,等. 毛乌素沙地凝结水动态变化及其影响因子的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8):61-66.
- [18] 王哲,梁煦枫,王德建,等. 鄂尔多斯风沙滩地区土壤凝结水试验研究[J]. *地下水*, 2006, 28(6):28-31.
- [19] 冯欣,高业新,张亚哲. 华北平原典型区域土壤凝结水观测及其影响因素研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013(5):132-135.
- [20] 陈荣毅. 古尔班通古特沙漠表层土壤凝结水水汽来源特征分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4):985-989.
- [21] 王哲,刘少玉,李娣,等. 鄂尔多斯盆地风沙滩区凝结水形成机理的试验研究[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(4):496-501.
- [22] 崔晓梅. 中国干旱半干旱地区土壤凝结水成因分析[J]. *中国高新技术企业*, 2007(9):207-207.
- [23] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. Dew deposition and drying in a desert system: A simple simulation model[J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42(3):211-222.
- [24] 郭占荣,刘建辉. 中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(4):576-580.