

坝上地区老芒麦草地土壤水分和生物量变化特征

王 皓, 李子忠^{*}
(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要: 于 2004~2007 年利用 TDR 对田间土壤水分动态进行监测, 研究了该地区不同降水年型下多年生老芒麦草地土壤水分的动态变化特征, 同时对该地区老芒麦的耗水特性和生长特征进行了分析。结果表明, 土壤水分在 6 月下旬达最低值, 7 月中旬牧草头茬草收割后土壤贮水开始迅速增加, 至 8 月份雨季结束后又迅速下降。老芒麦的生物量以头茬草为主, 干物质的主要积累时期为 6 月下旬到 7 月初的拔节抽穗期。该地区牧草的主要干物质积累时期和土壤水分的充分供给时期存在严重的不一致, 建议进行土壤水分季节调控或人工草地的生育期调节研究。

关键词: 老芒麦草地; 土壤水分变化; 生物量变化; 人工草地; 坝上地区

中图分类号: S152.7⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)03-0090-06

河北坝上农牧交错带地处内蒙古高原的南缘, 畜牧业是该地区的主要经济支柱, 由于该地区为半干旱气候, 水分条件较差, 导致牧草的生长受到抑制, 牧草供给不足成为制约该地区畜牧业发展的主要障碍, 而水分是限制牧草生长的主要因素^[1]。目前国内外对牧草水分管理的研究表明灌溉可以显著提高人工牧草的产量^[2~7], 但会破坏地下水生态系统的稳定性^[8]。近年来坝上地区的水资源面临总量持续减少、地下水开采严重及水资源污染严重等许多问题, 提高水资源利用效率势在必行^[9, 10]。披碱草属多年生老芒麦, 因其抗旱、抗寒性强, 越冬性好, 是华北农牧交错带具有较高经济价值的牧草^[11, 12]。近年来, 老芒麦种植面积迅速扩大, 已成为该区域建立人工草地和改良天然草场的主要栽培牧草。因此, 研究老芒麦人工草地的土壤水分特征可为科学调控田间水分和提高草地的水分利用效率提供可靠的数据支撑^[13]。

关于土壤水分动态变化的研究, Zhao 的研究表明西北半干旱地区苜蓿生长季土壤贮水量呈降低趋势, 整个生长季都处在水分亏缺中^[14]; 马月存等对农牧交错带不同耕作方式的莜麦各生育期的土壤水分作了对比, 没有涉及土壤水分动态变化同作物生长之间的关系^[15]。对作物不同生长时期的需水量的研究表明作物各个时期对水分的敏感程度并不是一样的^[16~18]。因此, 充足的水分应该补充给作物对水分最敏感的生长季节, Justes 的研究认为前一年

的土壤水分可以保留到第二年供牧草利用^[19], 表明水分在土壤中贮存到作物的水分敏感期是可以实现的。

坝上地区地势平坦, 光、热、温配合较好, 但灌溉条件较差, 存在很大比例的雨养畜牧业区, 而降水只有在转化成土壤水后才有可能被作物吸收利用, 因此必须以土壤水为核心建立作物—水分的相互影响机制。对该地区自然降雨下老芒麦草地的水分动态变化的研究尚不多见, 结合作物生长情况对牧草水分管理的建议也不多。本研究从该区域主要牧草土地的水分贮量和生物量动态变化的联系入手, 期望为人工草地的水分管理提供建议。

1 材料与方法

1.1 研究地自然概况

试验于 2004~2007 年在农牧交错带典型地段——位于河北省坝上地区的“河北沽源草地生态系统国家野外科学观测研究站”的鱼儿山牧场进行。试验区地处丰宁满族自治县西北部, 东经 116°11′, 北纬 41°45′, 海拔 1 460 m。属于半干旱大陆季风气候带, 年均温 1℃, 1 月份平均气温 -18.6℃, 7 月份平均气温 17.6℃, ≥10℃ 积温 1 600℃~2 200℃, 无霜期 85 d。年平均降水量在 300~400 mm, 主要集中在 6~9 月。年平均蒸发量 1 735.7 mm, 年日照时数 2 930.9 h。主要土壤类型为栗钙土, 土壤质地为砂质壤土。试验地土壤的基本理化性质见表 1。

收稿日期: 2008-12-19
基金项目: 国家自然科学基金项目 (30471228); 国家科技部科技支撑项目 (2006BAD16B01)
作者简介: 王 皓 (1982—), 男, 山东禹城人, 博士生, 研究方向为农业水土资源利用。E-mail: wanghchau@163.com。
^{*} 通讯作者: 李子忠 (1972—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源利用和土壤物理学研究。E-mail: zizhong@cau.edu.cn。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Primary soil properties of experimental site

土层 Soil depth (cm)	容重 Bulk density (g/cm ³)	有机质 Organic matter (g/kg)	速效氮 Available nitrogen (mg/kg)	速效磷 Available phosphorus (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	pH	电导率 Electrical conductivity (mS/cm)	田间持水量 Field capacity (m ³ /m ³)	萎蔫含水量 Wilting point (m ³ /m ³)
0~15	1.40	28.94	99.17	2.73	90.93	8.20	0.15	0.268	0.088
15~30	1.49	25.07	84.34	1.60	67.58	8.32	0.15	0.275	0.087
30~45	1.63	16.89	51.54	0.89	54.72	8.42	0.15	0.184	0.044
45~60	1.59	6.67	30.45	0.77	47.09	8.48	0.14	0.162	0.062

1.2 试验设计

试验所用材料为青海省畜牧兽医科学院培育的青牧 1 号多叶老芒麦 (*Elymus sibiricus* L. cv “Duoye”), 试验分为两期进行, 其中 2004~2005 年为第一期, 采用 2002 年 8 月 1 日播种的老芒麦, 2006~2007 年为第二期, 采用 2005 年 6 月 15 日播种的老芒麦(机械条播并覆土镇压, 行距 33 cm), 两期试验均选用未灌溉处理, 播种量为 25 kg/hm², 播种前及每年 5 月份牧草返青后撒施尿素(含 N 46%) 130 kg/hm², 磷酸二胺(含 N 21%、P₂O₅ 46%) 70 kg/hm²。试验小区大小为 20 m×8 m, 每两个小区间隔 1.5 m 作为保护行, 3 个重复。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤含水量的测定 用时域反射仪(加拿大 Environmental Sensors Inc. 生产, 型号为 MP-917)监测 0~15、15~30、30~45 和 45~60 cm 的土壤体积含水量, 3~5 d 测定 1 次, 并根据各层的土壤体积含水量计算 0~60 cm 土壤贮水量, 结合田间持水量和萎蔫持水量计算有效贮水量。

1.3.2 生育期观测 对老芒麦的生长过程进行观测, 根据各生育期的生长发育特点判定返青、分蘖、拔节、抽穗、再生期等生育期^[20]。

1.3.3 降水量的测定 用安装在试验地中央的雨量器(天津气象仪器厂 SDM6 型)测定降水量。

1.3.4 气象数据 1985~2005 年的月降水资料、日均温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、10 m 平均风速等资料来自当地气象部门。

1.4 计算方法

1.4.1 田间最大有效持水量及土体有效贮水量的计算

$$TAW = W_{FC} - W_{WP} \tag{1}$$

$$ASW = W - W_{WP} \tag{2}$$

$$RSW = TAW \times p + W_{WP} \tag{3}$$

其中, W_{FC} 为田间持水量(mm); W_{WP} 为萎蔫持水量(mm); TAW 为田间最大有效持水量(mm); ASW 是

土体有效贮水量(mm); W 为土体贮水量(mm); RSW 为作物开始遭受水分胁迫时的临界贮水量(mm); p 为跟作物有关的系数^[21]。

1.4.2 田间参考作物蒸散量 通过FAO推荐的下列公式获得^[21]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \tag{4}$$

其中, ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); R_n 为冠层表面净辐射通量[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量密度[MJ/(m²·d)], 本文取该值为 0; T 为 2 m 处日平均温度(°C); e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa); u_2 为 2 m 处风速(m/s), 可以由 10 m 处风速进行转化; Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线斜率(kPa/°C); γ 为干湿表常数(kPa/°C)。式中所需参数均可由气象数据进行计算, 详细计算方法参见^[21]。

1.4.3 作物蒸散量 采用农田水分平衡方程^[21], 即

$$ET = P + I - \Delta W - S \tag{5}$$

其中, ET 为作物蒸散量(mm); P 为降雨量(mm); I 为灌溉量(mm); ΔW 为土体贮水量的增量(mm); S 是土体下边界水分渗透量(mm), 当补充水量与土壤贮水量之和大于田间持水量时, 本文假设多余的水分渗漏到下层土壤。

2 结果与分析

2.1 降水及参考作物蒸散量的季节变化

在农牧交错地区, 牧草生育期集中在 5~9 月份, 5~7 月份为头茬草生长时期, 8、9 月份为再生草生长时期。四年的试验中, 老芒麦生育期降水量分别为 242.1、397.3、265.0 和 234.5 mm(图 1), 分别占多年生育期平均降水量(278.7 mm)的 87%、143%、95%和 84%。张娜等^[22]以多年平均降水量±10%作为丰水年和偏早年的划分标准, 因此该地区 2004、2007 年属于偏早年, 2005 年为丰水年, 2006 年为平水年。该地区出现暴雨的记录很少, 四年的试

验中超过 30 mm 的降雨极其有限。在整个生育期内,5、6 月份降水较少,6 月下旬开始进入雨季,7~8 月份是最主要的降水季节,四年的试验中这两个月降水总和分别占到生育期降水总量的 50%、56%、61%和 60%,其中 7 月多年平均降水量为 97.9 mm,占整个老芒麦生育期降水量的 35%。坝上地区参考作物蒸散量的日变化较大,但存在一定的趋势(图 1)。5~6 月份是参考作物蒸散量最大的时期,最大值一般在 6 mm/d。7、8 月份雨季来临时,参考作物蒸散量开始逐渐降低。

2.2 人工草地土壤水分时空分布

坝上地区土壤含水量以表层 0~30 cm 土层的

土壤含水量变化较大,底层土壤受降雨和作物蒸腾的作用较小,变化较小(图 2)。土壤含水较高的时期分布在返青初期和每年的 8 月份,水分主要集中在表层 0~30 cm 土层,其余时期土壤含水量较小。6 月中旬到 7 月中旬的一个月是土壤含水量最低的时期,该时期土壤各层含水量一般都在 $0.10\text{ m}^3/\text{m}^3$ 以下。8 月份雨季是含水量丰富的时期,一般从表层的 $0.20\text{ m}^3/\text{m}^3$ 递减至底层的不足 $0.08\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。返青初期的高水分分布可能主要是由于冻融条件下土壤水分的“冻后聚墒”,导致表层土壤水分较高;8 月份是雨季,补充的水分较多,且该时期人工牧草的最大需水期已过,作物耗水较少,导致表层水分增加较快。

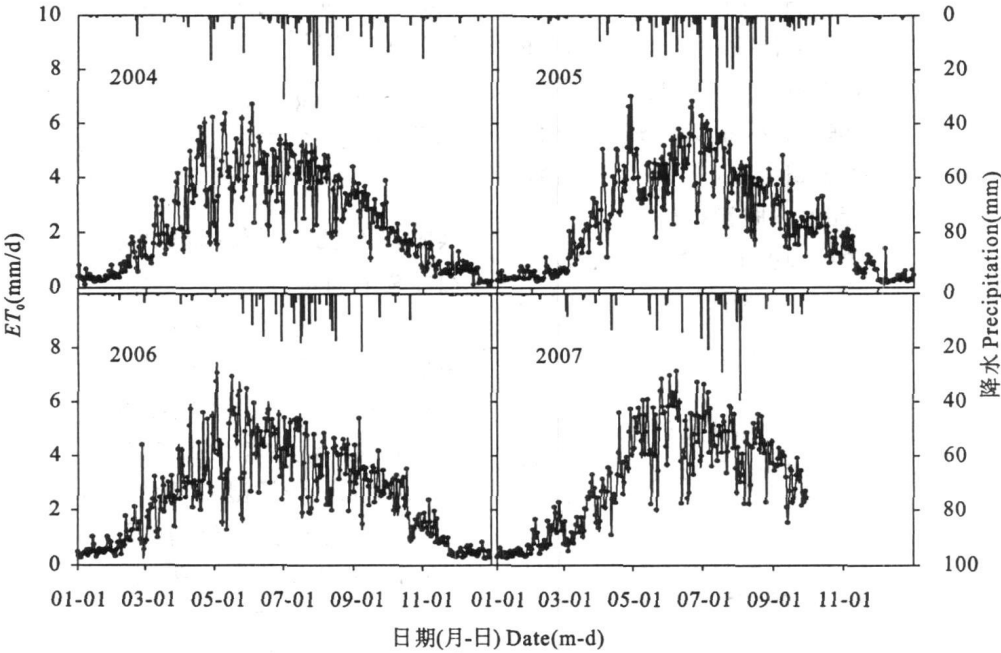


图 1 试验地点降水及参考作物蒸散量的动态变化
Fig.1 The precipitation and dynamic ET_0 at study site(2004 ~ 2007)

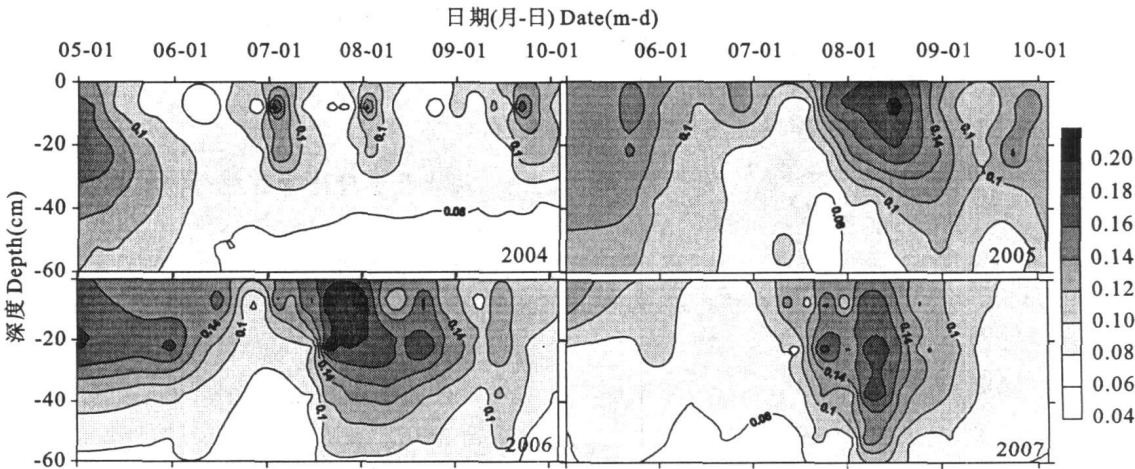


图 2 牧草生育期土壤各层体积含水量的时空分布 (m^3/m^3)

Fig.2 The temporal and dimensional distribution of soil water content during the growing seasons(2004 ~ 2007)

2.3 人工草地贮水量及生长规律动态分析

由于该地区地下水埋深较深(6~7 m),土壤水分状况主要受自然降水和作物蒸腾的影响(图 3)。Allen 认为当 $ASW > p \times TAW$ 时,作物的日蒸散量达最大值并趋于稳定,作物不受水分胁迫。 p 值因作物的特性而异,一般在 0.4~0.6 之间。老芒麦属冷季牧草,抗旱性较强,本文取 $p = 0.4^{[21]}$ 。老芒麦草地的水分条件比较差,0~60 cm 土壤贮水量长期处于 RSW 以下,生育期大部分时间遭受水分胁迫作

用,其中 6~7 月份是遭受水分胁迫最严重的时期,四年的试验中只有 2006、2007 年的雨季出现短时期的水分充裕期,作物短期内不受水分胁迫。2004、2007 年两个偏旱的年份,土壤贮水多次达到 W_{WP} ,但由于土壤表层的水分状况要好于下层,使根系较多的表层水分并未达到萎蔫点(图 2),是作物没有出现枯萎的原因。2004~2006 年都在返青初期出现水分相对充裕期,但水分贮量仍然在 RSW 以下。

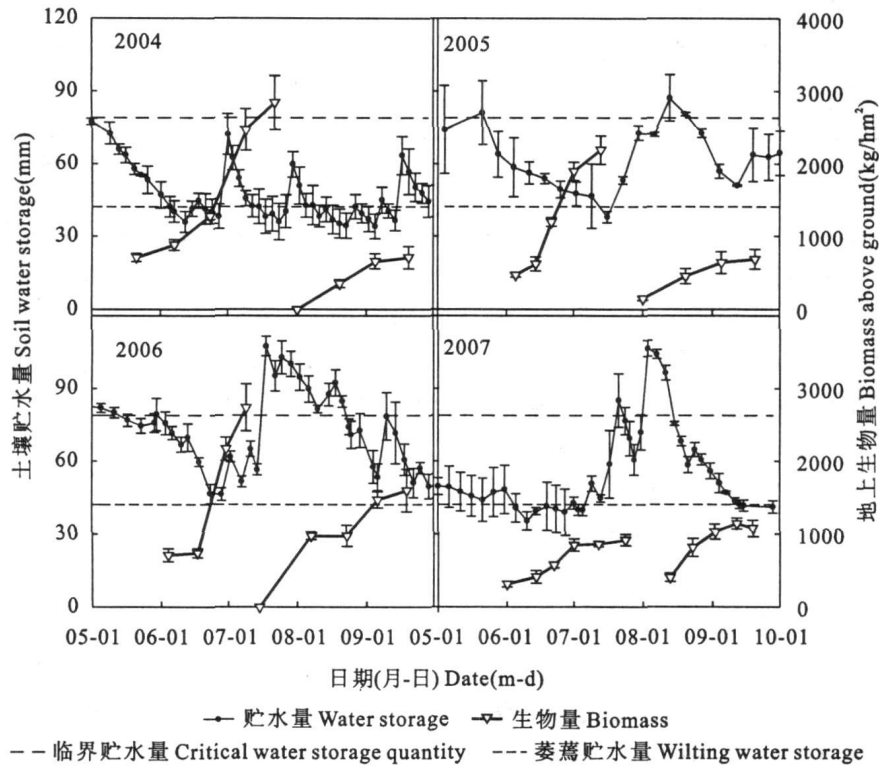


图 3 牧草生育期土壤贮水量及地上部生物量的动态变化

Fig. 3 The dynamics of soil water storage in 0~60 cm and biomass above ground during the growing seasons (2004~2007)

纵观全生育期,该地区老芒麦草地土壤水分一般在返青时和 8 月份雨季出现两个高峰,在返青一拔节期和生育末期会出现两个突降。作物在生长中期以蒸腾占主导地位,生长初期和末期以土面蒸发占主导地位^[23]。因此,老芒麦返青期和生育末期的水分突降主要是由于较高的土面蒸发造成的,拔节期的水分突降则主要是由于作物的高蒸腾作用。

坝上地区老芒麦产量以头茬草为主(图 3),2004、2006 年头茬草的地上部生物量最终达到 2 800 kg/hm²左右,2007 年属干旱年,头茬草和再生草的生物量都很低,且差别不大。老芒麦返青后到每年的 6 月中旬,其生物量的增加并不明显,每年 6 月中旬到 7 月初的拔节抽穗期是生物量迅速增大的时期;刈割后,生物量的增加不明显。因此,在牧草的最快生长期,也是最需要水分的拔节抽穗期,雨季尚未来

临,土壤贮水量为全年的最低值,是作物遭受水分胁迫最严重的时期。这就导致牧草最需要水分的季节降雨补给不足,而水分充足的季节已过了牧草的主要生长期,形成了水分供给与牧草生长之间的严重矛盾。

2.4 人工牧草耗水规律分析

不同降水年型下老芒麦在各生育期的平均日蒸散量存在差异(表 2)。生长初期日蒸散量较低,各年份的差异不显著;拔节抽穗期是头茬草蒸散量最大的时期,除了降水较多的 2005 年和降水较少的 2007 年外,其余年份该时期的平均日蒸散量同其它生育期均具有显著差异,其中较干旱的 2007 年在这两个时期的蒸散量分别为 1.4、1.6 mm/d,显著低于另外三个年份;2004 年虽然属干旱年,但在拔节和抽穗期的平均日蒸散量分别达到 2.2、2.8 mm/d;由

于再生草生长缓慢,再生期的无效蒸发较大,导致该生育期蒸散量较高。再生期的日蒸散量的年际间变化较大,干旱年份的数值较低,雨量大的年份蒸散量较大。纵观全生育期,雨量大的年份平均蒸散就越大,2005 年达到 2.5 mm/d,2007 年只有 1.5 mm/d。

该地区参考作物蒸散量的最大值一般集中在 5 月份的返青分蘖期(图 1),自然降雨条件下作物实际蒸散量的最大值集中在 6 月下旬的拔节抽穗期,二者并不一致。

表 2 老芒麦不同生育期的日平均蒸散量(mm/d)
Table 2 Daily evapotranspiration at different growing stage

年份 Year	返青 Reviving	分蘖 Tillering	拔节 Elongating	抽穗 Heading	再生 Re-growing	全生育期 Total
2004	1.7 aB	1.7 bB	2.2 abA	2.8 aA	1.8 bB	2.0 ab
2005	1.6 aB	2.8 aB	2.9 aA	2.7 aA	2.5 aAB	2.5 a
2006	1.1 aC	1.7 bB	2.5 aA	2.3 abA	2.5 aA	2.2 a
2007	1.3 aC	1.4 bB	1.4 bB	1.6 bA	1.6 bA	1.5 b

注:采用 LSD 法对不同年份相同生育期(小写字母)和同一年份不同生育期(大写字母)进行差异性检验,不同字母表示差异显著,显著水平 $P=0.05$ 。

Note: Lowercase letter within a column mean the same growing stage in different years, while the capital letters within a row mean different growing stages in the same year. Different letters mean significant difference at $P=0.05$ according to LSD test.

3 结论与讨论

1) 坝上地区的雨季集中在 7~8 月份,土壤水分的波动以表层为主,主要水分集中在 30 cm 土层内,下层土壤含水量的变化很小。土壤贮水量呈现返青期和 8 月份雨季两个高峰,返青一拔节期和生育末期则出现两个突降期,6 月下旬是水分条件最差的时期。该地区老芒麦头茬草生长季节为 5 月初到 7 月,再生草生长季节为 8 月到 9 月,其中干草产量以头茬草为主,6 月中下旬到 7 月初的拔节抽穗期是干物质积累的主要时期。牧草的最快生长期与土壤水分充裕期不重合,导致水分不能被充分利用。为了最大程度地获取高产,应该优先考虑牧草快速生长期的水分供给。

2) 四年试验期间,2004、2006 年的生物量最大,而两年的生育期降雨量分别占多年生育期平均降雨量的 87%和 95%,分别属于干旱年和平水年,2005 年生育期的降雨量高出多年平均值 43%,但生物量低于 2004 和 2006 年。因此,生物量的大小还同降雨在作物生长期间的分布有关系。2004 年虽然总降雨量较小,但在老芒麦的拔节抽穗期的降雨较大,导致该时期土壤贮水量较高,日蒸散量较大(表 2)。老芒麦在拔节抽穗时期的日蒸散量越低,作物遭受水分胁迫越严重,生物产量就越低。张家诚指出季节性降雨量中为作物生长直接或间接利用的称为有效降水量,否则为无效降水^[24],而坝上地区的气候条件导致了 8 月份的降水不能被作物有效利用,给当地牧草的产量造成极大的影响。在灌溉设备比较

薄弱的地区,将雨季的土壤水分保持到下一个牧草快速生长期,或者将牧草的快速生长期延迟到降水充裕期,促进自然降水的高效利用是提高水分利用效率的有效措施。

参 考 文 献:

[1] 韩建国,孙启忠,马春晖.农牧交错带农牧业可持续发展技术[M].北京:化学工业出版社,2004:42—78.

[2] Jin M G, Zhang R Q, Sun L F, et al. Temporal and spatial soil water management: a case study in the Heilonggang region, PR China[J]. Agricultural Water Management, 1999,42(2):173—187.

[3] Jensen K B, Asay K H, Waldron B L. Dry matter production of orchardgrass and perennial ryegrass at five irrigation levels[J]. Crop Science,2001,41(2):479—487.

[4] Lauriault L M, Kirksey R E, VanLeeuwen D M. Performance of perennial cool-season forage grasses in diverse soil moisture environments, southern high plains, USA[J]. Crop Science, 2002,45(3):909—915.

[5] Waldron B L, Asay K H, Jensen K B. Stability and yield of cool-season pasture grass species grown at five irrigation levels[J]. Crop Science, 2002,42(2):890—896.

[6] Smeal D, O'Neill M K, Arnold R N. Forage production of cool season pasture grasses as related to irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005,76(3):224—236.

[7] 王志强,朝伦巴根,高瑞忠,等.多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2006,22(12):49—55.

[8] Zhang X Y, Pei D, Hu C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2003, 21(4):159—166.

[9] Li J M, Inanaga S, Li Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2005,76(1):8—23.

[10] 魏 颢,任树梅,杨培岭,等. 围场地区紫花苜蓿土壤水分动态变化与根系分布状况研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 448—451.

[11] 毛培胜,韩建国,吴喜才. 收获时间对老芒麦种子产量的影响[J]. 草地学报, 2003, 11(1): 33—37.

[12] 刘文清,陈凤林. 老芒麦需水特性及灌溉效果的研究[J]. 草地学报, 2004, 3(1): 57—59.

[13] 李子忠,黄 顶,王忠彦. 灌溉制度对老芒麦(*Elymus sibiricus*) 生长的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1621—1628.

[14] Zhao C Y, Feng Z D, Chen G D. Soil water balance simulation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in the semiarid Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(2): 101—114.

[15] 马月存,秦红灵,高旺盛,等. 农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2523—2530.

[16] Fang Q X, Chen Y H, Yu Q, et al. Much improved irrigation use efficiency in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(10): 1517—1526.

[17] Zhang B C, Huang G B, Li F M. Effect of limited single irrigation on yield of winter wheat and spring maize relay intercropping[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 529—537.

[18] Demir A O, Goksoy A T, Buyukcangaz H, et al. Deficit irrigation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in a sub-humid climate[J]. *Irrigation Science*, 2006, 24(4): 279—289.

[19] Justes E, Thiebeau P, Avicé J C, et al. Influence of summer sowing dates, N fertilization and irrigation on autumn VSP accumulation and dynamics of spring regrowth in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(366): 111—121.

[20] 中国气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 中国气象出版社, 1993: 167—190.

[21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: FAO *Irrigation and Drainage Paper* 56, 1998, 159—182.

[22] 张 娜,梁一民. 干旱气候对白羊草群落土壤水分和地上部生长的初步观察[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 964—970.

[23] 刘承吉,郭克贞,何京丽. 草原灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 42—83.

[24] 张家诚. 西北干旱地区的水分评价问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 44—47.

Seasonal characteristics of soil water and biomass of siberian wildrye grass (*Elymus sibiricus* L.) in Bashang Plateau

WANG Hao, LI Zi-zhong

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To investigate the seasonal characteristics of soil water storage and crop growth in semiarid Bashang Plateau, field experiments were conducted during 2004~2007. The soil water was measured by TDR, and the water consumption and growth of siberian wildrye grass were determined under the condition of different precipitation years. The results showed that soil water storage decreased to the wilting point at late June, increased quickly during the rainy season after the first cutting, and decreased again after the rainy season. However, the forage yield of siberian wildrye grass was dominated by the first cutting, and the most critical growing stage was the arid elongating-heading stage from late June to early July. Therefore, the conflict existed between the rapidly growing of siberian wildrye grass and soil water supply in this region. Some ways should be studied to regulate the seasonal distribution of soil water or the growing stages of forage grass.

Keywords: variation of soil water; variation of biomass; artificial grassland; Bashang Plateau