

宁夏黄土丘陵区苜蓿土壤水分的时空变异特征

蔡进军, 张源润, 潘占兵, 董立国, 许浩,

王月玲, 季波, 马璠, 韩新生, 李生宝

(宁夏农林科学院 荒漠化治理研究所, 银川 750002)

摘要: 土壤水分是影响半干旱区植被生长和生态修复的限制性生态因子, 开展土壤水分变化研究对脆弱生态系统的恢复和生产实践活动的指导都具有重要作用和实际意义。对半干旱黄土丘陵区苜蓿在时空尺度上土壤水分状况的变化规律进行了分析。结果显示: (1) 不同类型苜蓿土壤体积分含水量的年际变化规律大致相同, 生长季变化大致可分为三个时期: 土壤水分消耗期(3—5 月)、土壤水分相对稳定期(6—7 月)和土壤水分积累期(8—10 月); (2) 以不同深度土壤体积分含水量的变异系数为标准, 可将土壤水分的垂直分布划分为三个层次: 0—20 cm 土壤水分速变层、20—80 cm 土壤水分活跃层和 80—180 cm 土壤水分相对稳定层; (3) 土壤体积分含水量的坡向变化规律为西坡>北坡>南坡>东坡, 不同年份规律大致相同, 但有小范围的波动, 坡位变化规律为坡上<坡中<坡下, 不同年份间的变化基本一致。

关键词: 紫花苜蓿; 土壤体积分含水量; 时空变异

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0075-05

The Characteristics of Spatiotemporal Variability of Soil Water of Alfalfa Fields in Hilly and Gully Loess Regions of Ningxia

CAI Jinjun, ZHANG Yuanrun, PAN Zhanbing, DONG Ligu, XU Hao,

WANG Yueling, JI Bo, MA Pan, HAN Xinshe, LI Shengbao

(Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Soil moisture is one of the restrictive ecological factors affecting the growth of vegetation and ecological restoration in the semi-arid region, the research for variation of soil moisture has the important role and practical significance for guidance to fragile ecosystems restoration and production practices. The temporal and spatial scales of variation of soil moisture condition in alfalfa fields were analyzed in semi-arid loess hilly region. The results showed that: (1) the inter annual variation of soil volumetric water contents in different types of alfalfa fields was substantially same, variations in the growing season could be roughly divided into three periods: the soil water consumption period (from March to May), relative soil moisture stabilization period (from June to July) and soil moisture accumulation period (from August to October); (2) if the coefficients of variation of the soil volumetric water contents in different soil depths were set as the standard, vertical distribution could be divided into three layers in soil profile: soil moisture rapid change layer (0—20 cm), soil moisture active layer (20—80 cm), and soil moisture relative stabilizing layer (80—180 cm); (3) soil volumetric water contents decreased in the order: the west slope>north slope>south slope>east slope, the patterns of soil water contents were almost the same in different years in terms of the slope aspects, but there were small-scale fluctuations, the variation levels increased in the order: upper slope<middle slope<down slope with respect to the slope positions, the variation was roughly same in different years.

Keywords: *Medicago sativa*; soil water content; spatial and temporal variability

土壤水分是土壤—植物—大气连续体关键的重要因子之一, 是影响半干旱区植被恢复和重建的核心生态因子之一, 是土壤中养分流动和循环的重要载体

之一^[1]。土壤水分状况受到降雨^[2-4]、温度、太阳辐射等气象条件和植被种类^[5-6]、覆盖度等生物条件的影响, 同时受到坡向、坡位、坡度等地形条件的影响。土

壤水分状况不仅存在空间尺度的差异,还存在着明显的时间尺度变化,尤其是处于半干旱的黄土丘陵地区,降雨少而分布不均,土壤水分差异较大,分析土壤水分状况时空尺度的差异规律,为脆弱生态系统的恢复和植被的合理重建提供理论指导和科技支撑。紫花苜蓿(*Medicagosativa*)是多年生优良牧草,用途广,营养价值高,有“饲料皇后”和“牧草之王”的美誉^[7],是半干旱区的重要经济作物,由于黄土丘陵区光照充足、蒸散量大、干旱少雨、且干湿季分明,土壤水分状况成为影响紫花苜蓿生长的主要限制因子,研究其土壤水分状况更具紧迫性,本研究选择在典型半干旱区的黄土丘陵地带,调查紫花苜蓿的土壤水分状况,分析其土壤水分时空差异特征,对指导生产实践活动具有重大的帮助和实际意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市彭阳县白阳镇中庄小流域,地理坐标为东经 $106^{\circ}41' - 106^{\circ}45'$,北纬 $35^{\circ}51' - 35^{\circ}55'$,地貌类型属于黄土高原腹地梁峁丘陵地,平均海拔 1 600~1 700 m。流域气候类型为典型的温带大陆性气候,年平均风速 2.7 m/s,年平均气温 7.6°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $2\,200 \sim 2\,750^{\circ}\text{C}$,无霜期 140~160 d,多年平均降水量 442.7 mm,降水量集中且分配不均,主要集中在 7—9 月,年平均潜在蒸发量 1 360.6 mm,干燥度为 3.58^[8]。土壤类型以普通黑垆土为主,pH 值 8~8.5。

1.2 研究方法

土壤体积含水量采用德国产 TDR 时域反射仪

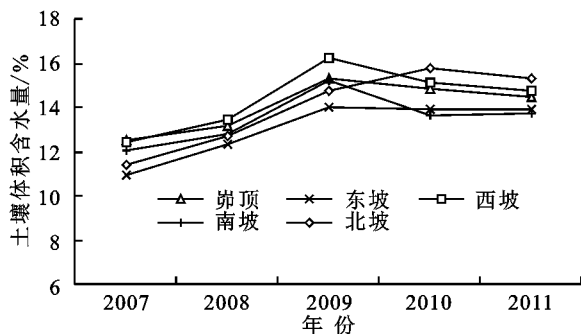


图1 土壤体积含水量的年际变化

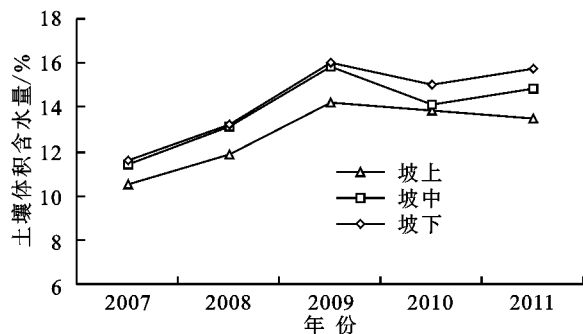
苜蓿土壤水分的生长季变化主要受到苜蓿生长节律、大气降雨量和土壤蒸发的影响^[12],本文选取 2008 年 3—10 月份苜蓿的土壤体积含水量及各月份的大气降雨量,用于分析苜蓿土壤体积含水量的生长季变化及大气降雨量对土壤体积含水量季节变化的影响,如图 2 所示,不同苜蓿的土壤体积含水量变化规律大致相同,从 3 月份到 5 月份苜蓿土壤体积含水

法(Time Domain Reflectometry)进行观测。选择能够代表半干旱黄土丘陵区的典型梁峁和坡面,分别在峁顶、东坡、西坡、南坡、北坡、上坡、中坡和下坡分别安装 TDR。研究地为 2003 年的退耕苜蓿地,现为多年生苜蓿地,在 2007—2011 年每年 3—10 月,每月上、中、下旬各测定一次,测定土层包括 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm, 100—120 cm, 120—140 cm, 140—160 cm, 160—180 cm,以 HOB 小型气象站进行降雨量的观测。数据处理采用 Excel 2010 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量的时间动态变化

以不同地形的苜蓿为基准,从 2007—2011 年连续监测苜蓿土壤体积含水量,研究苜蓿土壤体积含水量年际变化的总体特征。从图 1 可以看出,不同地形苜蓿的土壤体积含水量的年变化规律大致相同,2007 年逐渐增加到 2009 年,而后呈现缓慢降低的趋势,但各地形苜蓿的土壤体积含水量有其自身的变化规律。不同年份土壤体积含水量的大小依次为 2007 年(11.6%)、2008 年(12.8%)、2009 年(15.2%)、2010 年(14.5%)、2011 年(14.5%)。苜蓿土壤水分的年际变化主要受到年内土壤水分的输入和输出影响,在没有灌溉的前提下,年际降雨量是影响年际土壤水分输入的直接气象因子^[9-10],同一地区不同年份降雨及降雨时期的长短都存在差异,进而造成年际间土壤水分动态变化的差异^[11],土壤水分的输出主要受到植被的蒸腾、植被覆盖度、气温、太阳辐射、风速等条件的影响。



量逐渐消耗降低,主要是因为从 3 月份开始气温回升,太阳辐射逐渐增强,苜蓿逐渐开始生长,虽然有少量的降雨,但是难以维持苜蓿的生长和发育,必须要消耗土壤中存储的水分,土壤体积含水量逐渐下降。6—7 月份苜蓿土壤体积含水量处于一个相对稳定的时期,随着降雨量的逐渐增加,基本能满足苜蓿生长对水分的需求,同时,7 月份第一茬苜蓿进入开花初

期,也是第一茬苜蓿刈割的时期。从8月份到10月份苜蓿土壤体积含水量逐渐积累增加,主要是8月份,雨季的到来,降雨量逐渐增多,正值苜蓿处于幼苗期,需水量小,降雨能够满足苜蓿的生长所需,且还有一部分降雨贮存在土壤中,增加土壤体积含水量;进入9月份以后,温度降低,苜蓿生长缓慢,蒸腾量减小,且9月份的降雨是一年中最高的,土壤体积含水

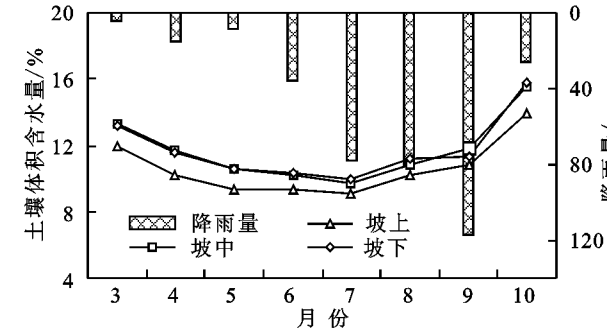


图2 苜蓿土壤体积含水量的生长季变化特征

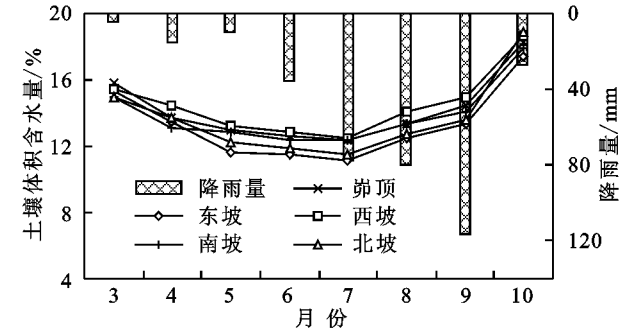
2.2 土壤含水量随土层深度的变化

以2007—2011年这5a的苜蓿各土层深度的平均值来分析不同土层深度土壤体积含水量的年际变化规律,从图3可以明显看出,不同土层深度苜蓿土壤体积含水量的变异情况差别很大,0—100 cm土壤体积含水量的变化范围明显大于100—180 cm,随土层增加苜蓿土壤体积含水量的变幅依次为6.8%,5.5%,4.5%,3.4%,2.6%,2.1%,2.1%,1.9%,2%,基本呈现出随土层深度的逐渐增加变幅逐渐减小,且减小的幅度逐渐缩小。5a内随土层加深苜蓿土壤体积含水量依次为15.5%,14.7%,13.8%,13.4%,13%,12.9%,12.9%,12.9%,12.8%,5a的总平均大致规律为随土层增加苜蓿土壤体积含水量逐渐减小,但总体差异较小。

为了更加明确地体现苜蓿土壤体积含水量垂直变化的年际情况,用变异系数 C_v 表示其变异特征,值越小表示土壤体积含水量的变异越小,反之则表示土壤体积含水量的变异越大^[13]。随土层增加苜蓿土壤体积含水量的变异系数依次为0.184,0.157,0.128,0.099,0.076,0.065,0.062,0.054,0.059,不同土层苜蓿土壤体积含水量变异系数的变化规律和变化幅度的规律相同。依据变异系数的大小^[14-15],将苜蓿土壤水分状况的垂直分布划分为三个层次:0—20 cm土壤水分速变层、20—80 cm土壤水分活跃层和80—180 cm土壤水分相对稳定层。随土层深度的增加变异系数逐渐减小是因为在没有灌溉条件下生长的苜蓿,只能依靠降雨输入进入土壤,降雨后,表层土壤体积含水量迅速增加,深层土壤水分含量只有依靠表层土壤的渗透才能缓慢增加。雨量大时一部分

量逐渐增加;进入10月份,夜晚的最低温度降到冰点左右,苜蓿生长受到抑制,蒸散量锐减,苜蓿进入第二茬的刈割期,土壤体积含水量再次增加。

由此可以看出,苜蓿土壤体积含水量的生长季变化大致可以分为三个时期:土壤水分消耗期(3—5月)、土壤水分相对稳定期(6月至7月)和土壤水分积累期(8—10月)。



存储到土壤中,一部分被植物吸收利用和以物理蒸发的形式回到大气中;雨量小时,可能全部用于植被吸收利用和物理蒸发,使表层土壤水分含量迅速增加后又降低,降雨前后土壤表层体积含水量的波动大于土壤深层,因而表层土壤体积含水量的变异系数较大,而深层土壤的较小。

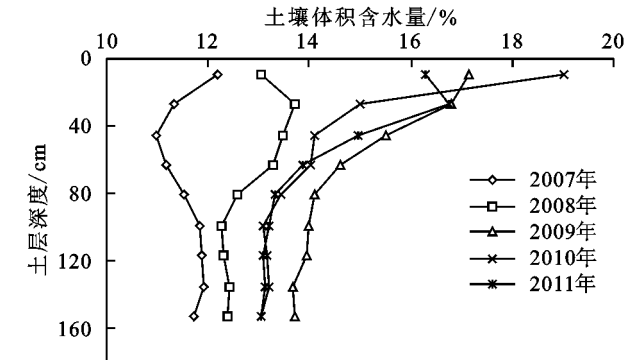


图3 土壤体积含水量随土层深度的年际变化规律

以2008年3—10月份苜蓿各土层的土壤体积含水量来分析不同土层深度土壤体积含水量的生长季变化规律。如图4所示,不同月份各土层深度苜蓿土壤体积含水量的差异很大。随着土层深度的增加,土壤体积含水量依次为14.3%,14.5%,14%,13.7%,12.8%,12.4%,12.5%,2.6%,12.5%,总体趋势表现为随着土壤深度的增加苜蓿土壤体积含水量逐渐降低,但存在着小范围的波动,变化特征总体上与年际差异规律相同。随着土层增加,苜蓿土壤体积含水量的变化幅度特征依次表现为11.2%,13.7%,12.5%,10.1%,3.5%,0.9%,1.4%,1.5%,1.6%,变幅规律大致为0—80 cm处于一个较大的变化范围,80—120 cm急剧下降,然后120—180 cm处于一个很小的变化幅度,生长季土壤水分变幅的变化规律与年际不同,但从

数值上来说生长季的变幅(6.3%)大于年际的变幅(3.4%),这可能与生长季的降雨量波动程度大于年际的降雨量波动程度有关。

利用变异系数 C_v 来表示生长季苜蓿土壤体积分含水量的垂直变化情况,随土层增加土壤体积分含水量的变异系数依次为 0.294, 0.331, 0.304, 0.246, 0.087, 0.033, 0.041, 0.041, 0.040, 变异系数的变化规律与变化幅度的差异规律相同,总体上来说生长季的变异系数大于年际的变异系数,这可能主要还是由于降雨量的差异程度不同和苜蓿的生长节律造成的。

2.3 土壤含水量的坡向和坡位变化

坡向和坡位是通过改变其他影响因子进而影响到土壤水分含量的,对土壤水分含量的变化起到间接的影响作用。苜蓿土壤体积分含水量的坡向和坡位变化如图 5 所示,苜蓿土壤体积分含水量的坡向变化总体表现为西坡(14.4%)>北坡(14%)>南坡(13.5%)>

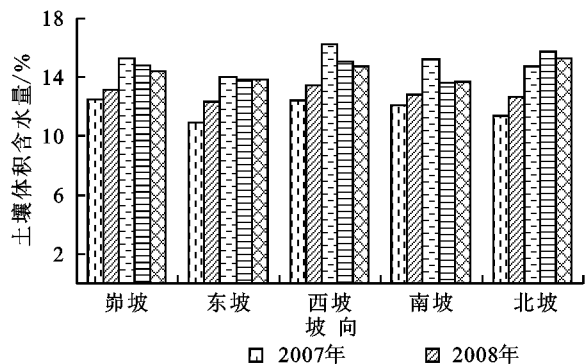


图5 土壤体积分含水量的坡向和坡位变化规律

3 结论与讨论

水分是影响干旱半干旱地区植被生长和发育的重要生态因子之一,在半干旱的黄土丘陵区研究苜蓿土壤水分时空变化规律对指导农业生产和脆弱生态系统的恢复具有重要意义。

(1) 不同类型苜蓿土壤体积分含水量的年变化规律大致相同,基本表现为从 2007 年逐渐增加到 2009 年,而后呈现缓慢降低的趋势,但存在着微弱的变化,可能是由于年际降雨量的不同造成的。苜蓿土壤水分的年际变化主要受到年际降雨量、植被的蒸腾耗水、温度、太阳辐射等条件的影响。朱宝文等^[16]研究高寒针茅草原植物表明,土壤水分年际变化与年降雨量相关关系显著,与本研究结果相同。

土壤水分的生长季变化主要受到大气降雨季节差异、植被生长节律等条件的影响,苜蓿土壤水分的生长季变化大致可以分为三个时期:土壤水分消耗期(3—5月)、土壤水分相对稳定期(6—7月)和土壤水分积累期(8—10月),主要是由于降雨的生长季节差异、苜蓿的生物学特性和当地的气候条件引起的。

东坡(13%),坡顶的土壤体积分含水量与北坡的相同,不同年份规律大致相同,但有小范围的波动;坡位变化总体表现为坡上(12.8%)<坡中(13.9%)<坡下(14.3%),不同年份间的变化基本一致。坡向和坡位的光照、温度等小地形气候的不同造成苜蓿土壤水分含量的差异。

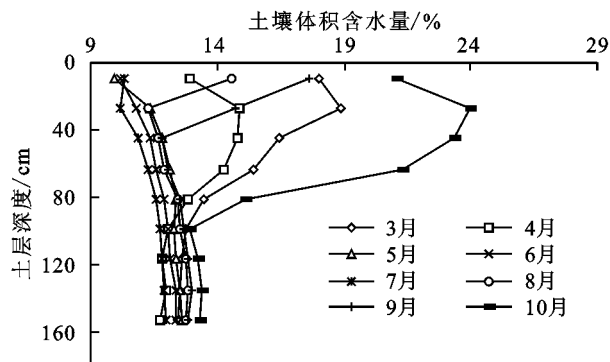
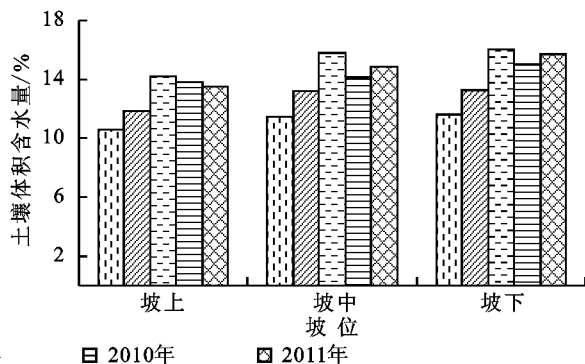


图4 土壤体积分含水量随土层深度的生长季变化规律



3—5月份土壤水分消耗主要是由于降雨稀少,温度逐渐升高,苜蓿生长逐渐旺盛,蒸散耗水量逐渐增大;6—7月份水分相对稳定是由于降水增多和苜蓿进入第一茬收获期等造成的;8月份土壤水分含量增加是因为苜蓿处于幼苗期需水量相对较少和降水量增加;9月份水分增加主要是由降雨量引起的;10月份持续增加主要是因温度较低和太阳辐射减弱等气候条件引起的。包志刚等^[17]研究大青山不同植被的土壤水分季节变化,土壤水分可分为3个时期,土壤失水期(4—6月)、土壤聚水期(7—9月)和土壤水分持续稳定期(10月到翌年3月),季节变化规律和本研究生长季节的变化特征存在着一定的差异。孔亮等^[18]研究黑龙江东部灌木林土壤水分表明,在整个生长季内,大气降水是土壤含水量变化的重要控制因子,与本研究结果一致。

(2) 以苜蓿不同土壤深度的平均值来分析土壤体积分含水量垂直分布的年际变化规律,变化幅度基本呈现出随土层深度的增加逐渐减小的规律;5 a 的土壤体积分含水量总平均大致规律为随土层增加呈现出

逐渐减小的变化趋势;变异系数的变化规律和变化幅度相同,王晶等^[19]研究黄土丘陵区不同林地不同土层深度变异系数的变化特征,结果与本研究相同。以变异系数为标准,可将苜蓿土壤水分的垂直分布划分为三个层次:0—20 cm 土壤水分速变层、20—80 cm 土壤水分活跃层和 80—180 cm 土壤水分相对稳定层。0—20 cm 土壤表层的水分含量受降雨的直接影响,降雨经过土壤表层才能逐渐深入到深层土壤,表层土壤对降雨的响应最为敏感,土壤水分含量增加最快,但由于该层与大气直接接触,土壤自身的蒸发也是不容忽视的一部分,还有苜蓿的生长需要消耗该层的水分,故雨后土壤水分含量降低也最快,该层为土壤水分速变层。20—80 cm 的土壤水分含量也存在明显的波动,但幅度小于 0—20 cm 土壤,这与水分在土壤中的运移有关,降雨只能经过表层土壤才能运移到该层,一次降雨过小就只能影响 0—20 cm 表层的土壤水分含量,对该层无影响,且该层受土壤物理蒸发影响较小,所以变化幅度小于表层,故称为活跃层。80—180 cm 受降雨、土壤蒸发等的影响很小,该层的土壤水分含量是稳定的,但在强烈蒸散和枯水期有一定的调节作用,只有在降雨量较大的情况下,水分才能运移到该层,对于水量适中的降雨,大多数都保留在上层土壤,并用于苜蓿的生长所需,只有少量或没有水分运移到该层,故该层为土壤水分相对稳定层。

以 2008 年 3—10 月份不同土层的土壤体积含水量来分析生长季的变化规律,土壤体积含水量随土壤深度的变化规律总体上与年际的相同;变幅的变化规律与年际变化不同,但从数值上来说生长季的变幅(6.3%)大于年际的变幅(3.4%);变异系数的变化规律与变化幅度的规律相同,总体上说生长季的变异系数大于年际的变异系数。刘强等^[20]研究红松人工土壤水分的垂直变化得出,随着土层加深,土壤含水率呈递减的趋势,主要是由于各层土壤质地、吸水力、水分垂直运动速度不同造成的,与本研究结果相同。王孟本等^[21]按土壤含水量的变幅将土壤剖面分为活跃层、次活跃层和相对稳定层,与本研究结论基本相同。土壤水分含量的垂直变化主要是当地的时空条件决定的,旱季一般随土层加深呈增长型,雨季一般呈降低型,植物的生长状况也会影响到土壤水分含量的垂直变化,另外特殊的小地形等条件也会影响土壤水分的垂直分布。

(3) 坡向和坡位是影响土壤水分的重要地形因子^[22]。苜蓿土壤体积含水量的坡向变化规律为西坡>北坡>南坡>东坡,不同年份变化规律大致相同,但有小范围的波动;坡位变化规律为坡上<坡中<坡下,

不同年份间的变化基本一致。一般情况下,西坡和北坡相对于东坡和南坡有较好的土壤结构、持水通透性能^[23],土壤水分含量的坡向变化主要是由于土壤结构和特性不同造成的。本研究中西坡土壤水分含量大于北坡可能是由坡向不同引起的局地降雨量不同造成的,在半干旱地区,北坡比西坡的苜蓿生长相对较好,生长消耗的水分也相对较多,也可能是造成土壤水分西坡稍高于北坡的原因。另外,坡向影响光照、温度等外界环境条件,导致不同坡向土壤水分含量存在差异。同一坡面上不同坡位土壤水分再分配导致不同坡位土壤水分含量差异,小地形的气候条件也会影响到不同坡位的土壤水分含量,土壤含水量的坡位变化还会受降雨的影响,降雨后不同坡位的土壤水分含量由于水分的大量输入可能趋于一致,尤其是大暴雨。

参考文献:

- [1] 陈有君,关世英,李绍良,等. 内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J]. 干旱区资源与环境,2000,14(1): 80-85.
- [2] 刘苑秋,王红胜,郭胜茂,等. 江西省退化石灰岩红壤区重建森林土壤水分与降水量和蒸发量的关系[J]. 应用生态学报,2008,19(12):2588-2592.
- [3] 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.
- [4] 朱乐天,焦峰,刘源鑫,等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征[J]. 水土保持研究,2011,18(6):115-118.
- [5] 杨磊,王伟,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.
- [6] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报,2012,32(16): 4961-4968.
- [7] 戚志强,王永雄,胡跃高,等. 当前我国苜蓿产业发展的形势与任务[J]. 草业学报,2008,17(1):107-113.
- [8] 刘昌明. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] 黄志刚,李锋瑞,曹云,等. 南方红壤丘陵区杜仲人工林土壤水分动态[J]. 应用生态学报,2007,18(9):1937-1944.
- [10] 黄志刚,欧阳志云,李锋瑞,等. 南方丘陵区不同坡地利用方式土壤水分动态[J]. 生态学报,2009,29(6):3136-3146.
- [11] 何其华,何永华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报,2003,21(2):149-156.
- [12] 潘颜霞,王新平. 荒漠人工植被区浅层土壤水分空间变化特征分析[J]. 中国沙漠,2007,27(2):250-256.
- [13] 孙忠峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2): 81-86.

步研究要结合专家打分综合取得分。对于社会经济因素对耕地的布局影响和规划对空间安排考虑不足,这有待后期研究中进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 罗鼎,月卿,邵晓梅,等. 土地利用空间优化配置研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2009,28(5):791-797.
- [2] 唐常春,陈烈,魏成. 大都市边缘区域耕地数量变化的时空特征及动力机制:以广州市花都区为例[J]. 资源科学,2006,28(5):43-49.
- [3] 杨建云. 基于 EKC 模型的河南省工业化、城镇化水平与耕地面积关系研究[J]. 水土保持研究,2013,20(2):213-216.
- [4] 谭术魁,张红霞. 基于数量视角的耕地保护政策绩效评价[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(4):153-158.
- [5] 韦仕川,熊昌盛,栾乔林,等. 基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区[J]. 农业工程学报,2014,30(18):249-256.
- [6] 郭洪峰,韩蕾,许月卿,等. 云南省陆良县耕地等级变化及其影响因素研究[J]. 资源科学,2014,36(10):2075-2083.
- [7] 龙冬冬,赵宏波,宋戈,等. 河南省耕地集约利用时空变化特征研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):223-228.
- [8] 杨佳惠,雷国平,张健. 煤炭资源枯竭型城市鸡西市耕地集约利用评价[J]. 水土保持研究,2013,20(2):250-253.
- [9] 王瑞发,夏非,张永战. 青岛市近 10 年来耕地变化及其驱动力分析[J]. 水土保持研究,2013,20(2):108-114.
- [10] 杨绪红,金晓斌,郭贝贝,等. 基于最小费用距离模型的高标准基本农田建设区划定方法[J]. 南京大学学报:自然科学,2014,50(2):202-210.
- [11] 董秀茹,尤明英,王秋兵. 基于土地评价的基本农田划定方法[J]. 农业工程学报,2011,27(4):336-339.
- [12] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning,1992,1(23):1-16.
- [13] Yu K J. Land scape ecological security patterns in biological conservation [J]. Acta Ecologica Sinica,1999,1(19):8-15.
- [14] 刘孝富,舒俭民,张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用:以厦门为例[J]. 生态学报,2010,30(2):421-428.
- [15] 陈燕飞,杜鹏飞. 基于最小累积阻力模型的城市用地扩展分析[C]//中国城市规划协会和谐城市规划:2007中国城市规划年会论文集. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2007.
- [16] 常州市统计局,国家统计局常州调查队. 常州统计年鉴[Z]. 北京:中国统计出版社,2013.
- [17] 李纪宏,刘雪华. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区[J]. 自然资源学报,2006,21(2):217-224.
- [18] 俞孔坚,黄刚,李迪华,等. 景观网络的构建与组织:石花洞风景名胜景区景观生态规划探讨[J]. 城市规划学刊,2005(3):76-81.



(上接第 79 页)

- [14] 陈海滨,孙长忠,安锋,等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(I):土壤水分的垂直变化和季节变化特征[J]. 西北林学院学报,2003,18(4):13-16.
- [15] 舒维花,蒋齐,王占军,等. 宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林土壤水分时空变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(12):172-176.
- [16] 朱宝文,郑有飞,陈晓光. 高寒针茅草原植物生长季土壤水分动态变化规律[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):96-100.
- [17] 包志刚,陈晓燕,田有亮,等. 大青山不同植被下的土壤水分动态[J]. 内蒙古农业大学学报,2009,30(1):124-126.
- [18] 孔亮,蒙宽宏,陈宇,等. 黑龙江省东部山地灌木林土壤水分动态变化[J]. 东北林业大学学报,2005,33(5):44-46.
- [19] 王晶,朱清科,刘中奇,等. 黄土丘陵区不同林地土壤水分动态变化[J]. 水土保持研究,2011,18(1):220-223.
- [20] 刘强,王军,李艳红,等. 红松人工林生态系统土壤含水率变化规律[J]. 东北林业大学学报,2011,39(2):60-63.
- [21] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184.
- [22] 梁超,郝文芳,袁丁. 黄土丘陵区不同植被群落土壤水分研究[J]. 水土保持研究,2011,18(2):103-106.
- [23] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,1995.