调亏灌溉下菘蓝耗水量变化特征

王玉才，张恒嘉，邓浩亮，李福强，黄彩霞，薛道信
（甘肃农业大学 水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘　要：[目的] 研究膜下滴灌调亏灌溉对河西地区菘蓝耗水量和产量的影响，为干旱、半干旱区菘蓝的高产种植提供理论依据。[方法] 通过大田试验分析耗水量和产量变化。[结果] 在营养生长期和肉质根生长期各处理的耗水量呈现出随着水分亏缺程度的加剧逐渐降低，与 CK 相比显著降低(4.11%～15.71%，$p<0.05$)。耗水强度变化规律基本呈现出苗期最小(约 0.90 mm/d)，肉质根成熟期较大(约 1.60 mm/d)，营养生长期和肉质根生长期最大(约 3.00 mm/d)。WD_4(营养生长期和肉质根生长期轻度亏水)处理的菘蓝产量与 CK 无显著($p>0.05$)差异，达到8 235.32 kg/hm^2，WD_1(营养生长期轻度亏水)处理的水分利用效率最高〔23.62 kg/(hm^2 · mm)〕，WD_4 处理次之，且比 CK 提高 6.74%，即 WD_4 处理为最优处理。[结论] 轻度水分亏缺可以有效降低菘蓝各生育期的耗水量，提高菘蓝产量和水分利用效率。而重度水分亏缺则导致土壤水分显著降低，不利于菘蓝生长。

关键词：调亏灌溉；耗水量；土壤水分；菘蓝
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)02-0167-05　　**中图分类号**：S274.1

文献参数：王玉才，张恒嘉，邓浩亮，等. 调亏灌溉下菘蓝耗水量变化特征[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：167-171. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.027；Wang Yucai, Zhang Hengjia, Deng Haoliang, et al. Characteristics of *Isatis tinctoria* water consumption in regulated deficit irrigation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 167-171.

Characteristics of *Isatis Tinctoria* Water Consumption in Regulated Deficit Irrigation

Wang Yucai, Zhang Hengjia, Deng Haoliang, Li Fuqiang, Huang Caixia, Xue Daoxin
(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: [Objective] The water consumption and yield in the drip regulated deficit irrigation were studied by field experiment in order to provide a theoretical basis for the high yield planting of *Isatis tinctoria* in arid and semi-arid areas. [Methods] Water consumption and yield changes were analyzed by field trials. [Results] The water consumption in the vegetative growth period was gradually reduced with the increase of water deficit. Compared with the one of CK, water consumptions of regulated deficit irrigation reduced significantly by 4.11%～15.71%($p<0.05$). In an overall, the water consumption intensity basically showed its minimum in the seedling stage(about 0.90 mm/d). In the fleshy root maturity stage, it was larger(about 1.60 mm/d); and in the vegetative growth and fleshy root growth period, it got the largest(about 3.00 mm/d). There was no significant difference between the ones of WD_4(mild water deficit during growth and fleshy root growth) treatment and CK($p>0.05$). The yield of *Isatis tinctoria* reached 8 235.32 kg/hm^2. Treatment of WD_1 (mild water deficit during vegetative growth) had the highest water use efficiency 23.62 kg/(hm^2 · mm), the one of WD_4 was 6.74% and its was higher than the one of CK. Comparatively, WD_4 was the best treatment. [Conclusion] Moderate water deficit had no significant yield difference with the one of CK, hence it can effectively reduce the water consumption of each growth period and correspondingly improve the water use efficiency. However, severe water deficit leads to a significant decrease in soil moisture, which is not

收稿日期：2018-08-15　　**修回日期**：2018-10-16
资助项目：甘肃省重点研发计划项目“荒漠绿洲膜下滴灌调亏特色经济作物水生产力研究”(18YF1NA073)；国家自然科学基金项目(51669001)；甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金项目(GSAU-STS-1744)；甘肃农业大学水利水电工程学院青年教师科技创新项目(SLSDXY-QN2018-02)
第一作者：王玉才(1985—)，男(汉族)，甘肃省景泰县人，博士，讲师，研究方向为高效节水灌溉理论与农业生态。E-mail：wangyucai118@163.com。
通讯作者：张恒嘉(1974—)，男(汉族)，甘肃省天水市人，博士，教授，博士生导师，主要从事农业水土资源高效利用与农业生态研究。E-mail：zhanghj@gsau.edu.cn。

conducive to the growth of *Isatis tinctoria*.

Keywords: regulated deficit irrigation; water consumption; soil moisture; *Isatis tinctoria*

菘蓝(*Isatis tinctoria*)是常用的大宗中药材之一,是治疗感冒的常用药材,几乎所有的治疗感冒的中药配伍中都有菘蓝。菘蓝在我国广泛引种,河北、陕西、甘肃及江苏已成为主产地。但是在河西走廊一带由于水资源短缺,灌溉方式不合理,导致菘蓝的产量与水分利用效率较低。水分是干旱、半干旱地区影响生态环境变化和植物正常生长的最主要因素[1],因此,研究菘蓝的耗水规律和土壤水分动态对提高菘蓝产量和水分利用效率至关重要。在诸多耗水量计算方法中,作物系数法因其简单准确而被国内外学者[2-3]广泛应用于大田作物。土壤水分适时管理和耕作技术[4]也是影响作物耗水量的重要因素,同时如果土壤水分发生较大的变化,将会直接影响作物的生长状况和产量。菘蓝阶段耗水量和全生育期耗水量与其所处的自然环境和灌溉条件等因素有关。然而目前国内外学者[5-6]对菘蓝的研究主要集中在化学成分及药理学活性等方面,忽略了不同生育期、不同水分亏缺对土壤水分、耗水量和产量等影响。为此,本文通过在甘肃省张掖市民乐县的菘蓝大田试验,探讨水分调亏对膜下滴灌菘蓝不同生育阶段土壤水分变化和耗水特征的影响,进一步揭示菘蓝膜下滴灌的需水规律,为干旱、半干旱区菘蓝的高产种植提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验区概况

灌溉试验在甘肃省张掖市民乐县益民灌溉试验站进行。试验站在洪水河灌区中游(东径 100°43′,北纬 38°39′),海拔为 1 970 m。该地区气候干燥,水源不足,属大陆性荒漠草原气候。多年平均温度 6 ℃,最高温度 37.8 ℃,最低温度-33.3 ℃,年降雨量 183~285 mm,无霜期 109~174 d,年日照时数 3 000 h 左右。土壤属轻壤土,田间持水量(θ_f)为 24%(质量含水率),土壤容重 1.4 g/cm^3,地下水位为 20 m 左右,灌区基本不受盐碱化影响。

1.2 供试材料及栽培方式

供试品种选用甘肃农业大学中草药系自繁的粒大饱满、均匀一致的菘蓝种子,种子纯度 96%,发芽率为 87.6%,发芽势为 46.4%。2017 年 5 月 2 日播种,10 月 11 日收获,播种量为 30.0 kg/hm^2,种植密度为 700 350 株/hm^2,播前对试验小区进行 30 cm 的翻耕处理,人工除去杂草,同时施入尿素(N 含量 46%)210 kg/hm^2,过磷酸钙(P_2O_5 含量 12%,S 含量 10%,Ca 含量 16%)340 kg/hm^2,硫酸钾(K_2O 含量 25%)270 kg/hm^2,所有肥料都作为基肥在播种时一次性施入。滴灌铺设完毕进行无色地膜覆盖,地膜宽度 120 cm。每个试验小区之间用宽为 60 cm 的薄膜隔开,防止水分地下相互渗流。

1.3 试验设计

本试验为单因素随机试验,将菘蓝生育期按其生长特点分为 4 个生育期:苗期、营养生长期、肉质根生长期和肉质根成熟期,土壤水分设四个梯度,分别为充分灌水(F,土壤含水量为田间持水量的 75%~85%),轻度水分亏缺(L,土壤含水量为田间持水量的 65%~75%),中度水分亏缺(M,土壤含水量为田间持水量的 55%~65%),重度水分亏缺(H,土壤含水量为田间持水量的 45%~55%)。共 10 个水分调控处理,其中 CK 为对照处理,每个处理设 3 次重复,共 30 个小区,每小区面积 36 m^2(9 m×4 m),采用随机区组设计,有效试验种植面积为 1 080 m^2。灌水方法为膜下滴灌,灌水整个生育期内对土壤湿度控制的土层深度为 100 cm,水分控制上、下限范围与区域实际情况较为吻合,具体试验设计详见表 1。

表 1 不同试验处理的土壤含水量 %

处理	苗期	营养生长期	肉质根生长期	肉质根成熟期
CK	75~85	75~85	75~85	75~85
WD_1	75~85	65~75	75~85	75~85
WD_2	75~85	55~65	75~85	75~85
WD_3	75~85	45~55	75~85	75~85
WD_4	75~85	65~75	65~75	75~85
WD_5	75~85	65~75	55~65	75~85
WD_6	75~85	55~65	65~75	75~85
WD_7	75~85	55~65	55~65	75~85
WD_8	75~85	45~55	65~75	75~85
WD_9	75~85	45~55	55~65	75~85

注:土壤含水量为占田间持水率的百分数;WD_1 为营养生长期轻度亏水;WD_2 为营养生长期中度亏水;WD_3 为营养生长期重度亏水;WD_4 为营养生长期和肉质根生长期轻度亏水;WD_5 为营养生长期轻度亏水和肉质根生长期中度亏水;WD_6 为营养生长期中度亏水和肉质根生长期轻度亏水;WD_7 为营养生长期和肉质根生长期中度亏水;WD_8 为营养生长期重度亏水和肉质根生长期轻度亏水;WD_9 为营养生长期重度亏水和肉质根生长期中度亏水;CK 为各生育期正常供水。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤水分 土壤水分的测定采用传统方法烘干法,在每个小区随机选择,在连续两株菘蓝植株连线的中点处用土钻分别钻取小区土壤剖面内,0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm 和 80—100 cm

土层土壤,测定其含水率,因为菘蓝的根系主要分布在 0—50 cm 内,最后取 0—60 cm 土层的土壤水分的平均值作为湿润土层土壤内的水分值,而以 0—100 cm 层内土壤水分的变化来计算作物对土壤水分消耗量。

1.4.2　数据统计分析　利用 SPSS 19.0 软件中 Duncan 多重比较法比较各处理相关数据差异的显著性,GraphPad Prism 5.01 做图,各表中的数据均为平均值。

2　结果和分析

2.1　调亏灌溉下菘蓝的耗水量

由表 2 可知,菘蓝各水分调亏处理在全生育期内的耗水量受膜下滴灌调亏灌溉的影响,其中 CK 的全生育期耗水量最高(381.75 mm),其他各处理的全生育期耗水量均比 CK 显著降低($p<0.05$),降低幅度为 4.11%～15.71%,同时随着调亏程度的逐渐加重,依次从轻度—中度—重度调亏,其他各处理的全生育期耗水量也呈现逐渐下降的趋势。因此,水分调亏程度将会影响菘蓝全生育期的耗水量,且随调亏程度的增大,全生育期消耗的水量减少的愈加明显。2017 年不同处理间各个生育期耗水量表明,在苗期除了 WD_6 和 WD_7 处理,其余各处理的耗水量和 CK 间的耗水量差异不显著($p>0.05$);在营养生长期,CK 的耗水量最高,达到 140.89 mm,其他处理与其差异显著($p<0.05$),其次是轻中度水分亏缺的处理,重度水分亏缺处理的耗水量最低(WD_8 和 WD_9),较 CK 显著降低 16.69%和 15.62%;在肉质根生长期,CK 的耗水量最高,WD_1,WD_2 和 WD_4 处理与 CK 无显著差异,重度水分亏缺处理的耗水量最低(WD_9);在肉质根成熟期,WD_5 的耗水量最高,但 WD_1 处理的耗水量最低,为 57.31 mm,较 CK 显著降低 25.41%。在营养生长期和肉质根生长期随着调亏程度的加重,各处理的耗水量呈现逐渐下降的趋势。

表 2　菘蓝不同生育阶段耗水量

处理	耗水量/mm				
	苗期	营养生长期	肉质根生长期	肉质根成熟期	全生育期
CK	35.55^{a}	140.89^{a}	128.48^{a}	76.83^{ab}	381.75^{a}
WD_1	35.35^{a}	136.73^{b}	125.86^{a}	57.31^{d}	355.25^{cd}
WD_2	35.46^{a}	128.57^{c}	127.85^{a}	74.18^{ab}	366.06^{b}
WD_3	33.55^{ab}	113.52^{f}	122.35^{b}	74.20^{ab}	343.62^{f}
WD_4	32.77^{ab}	126.87^{c}	125.65^{a}	68.64^{abc}	353.93^{cde}
WD_5	33.58^{ab}	125.74^{c}	120.85^{b}	77.48^{a}	357.65^{c}
WD_6	31.75^{b}	120.78^{d}	118.82^{b}	77.31^{a}	348.66^{def}
WD_7	32.06^{b}	119.65^{de}	121.73^{b}	73.91^{ab}	347.35^{ef}
WD_8	32.98^{ab}	117.37^{e}	114.22^{c}	64.45^{cd}	329.02^{g}
WD_9	32.75^{ab}	118.87^{de}	108.36^{d}	67.80^{bc}	327.78^{g}

注:表中数值为每个处理 3 次重复的平均值;同列字母不同表示处理在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2　调亏灌溉下菘蓝不同生育阶段耗水强度

2017 年不同处理间耗水强度变化特征如表 3 所示。由表 3 可知,在苗期除了 WD_6 和 WD_7 处理其余各处理的耗水强度与 CK 间无显著差异($p>0.05$);在营养生长期,CK 的耗水强度最高,达到3.35 mm/d,其他处理与其差异显著($p<0.05$),其次是 WD_1,WD_4 和 WD_5 处理,WD_8 处理的耗水强度较 CK 显著降低 16.72%;在肉质根生长期,CK 的耗水强度最高,达到 3.21 mm/d,WD_1,WD_2 和 WD_4 处理与 CK 无显著差异,WD_8 处理的耗水强度最低;在肉质根成熟期,WD_5 的耗水强度最高,与 CK 无显著差异,但 WD_1 处理的耗水强度最低,为 1.37 mm/d,较 CK 显著降低 26.74%。耗水强度变化规律基本呈现出苗期最小(约 0.90 mm/d),肉质根成熟期较大(约 1.60 mm/d),营养生长期和肉质根生长期的最大(约 3.00 mm/d)。

表 3　菘蓝各个生育阶段耗水特征

处理	苗期		营养生长期		肉质根生长期		肉质根成熟期	
	耗水强度/(mm·d^{-1})	耗水模数/%	耗水强度/(mm·d^{-1})	耗水模数/%	耗水强度/(mm·d^{-1})	耗水模数/%	耗水强度/(mm·d^{-1})	耗水模数/%
CK	0.94^{a}	9.31^{bc}	3.35^{a}	36.91^{b}	3.21^{a}	33.66^{cd}	1.87^{ab}	20.13^{ab}
WD_1	0.96^{a}	10.23^{ab}	3.26^{b}	38.49^{a}	3.15^{a}	35.43^{ab}	1.37^{d}	15.85^{c}
WD_2	0.93^{a}	9.69^{abc}	3.11^{c}	35.67^{de}	3.20^{a}	34.93^{abc}	1.76^{ab}	19.72^{ab}
WD_3	0.88^{ab}	9.76^{abc}	2.70^{f}	33.04^{f}	3.06^{b}	35.61^{a}	1.81^{ab}	21.59^{ab}
WD_4	0.86^{ab}	9.26^{c}	3.02^{c}	35.85^{cd}	3.14^{a}	35.50^{ab}	1.67^{abc}	19.39^{b}
WD_5	0.88^{ab}	9.39^{abc}	2.95^{c}	34.60^{de}	3.02^{b}	33.79^{cd}	1.94^{a}	22.22^{ab}
WD_6	0.84^{b}	9.11^{c}	2.88^{d}	34.64^{e}	2.97^{b}	34.08^{bcd}	1.89^{a}	22.17^{a}
WD_7	0.84^{b}	9.23^{c}	2.85^{de}	34.45^{e}	3.04^{b}	35.05^{abc}	1.80^{ab}	21.28^{ab}
WD_8	0.87^{ab}	10.02^{a}	2.79^{e}	35.67^{cd}	2.86^{e}	34.72^{abc}	1.57^{cd}	19.59^{b}
WD_9	0.81^{ab}	9.38^{a}	2.83^{de}	36.27^{bc}	2.71^{d}	33.06^{d}	1.70^{bc}	21.29^{ab}

2.3 调亏灌溉下菘蓝不同生育阶段耗水模数

从表 3 可以发现，2017 年，在苗期除了 WD_8 和 WD_9 其余各处理的耗水模数与 CK 间无显著差异（$p>0.05$）；在营养生长期，WD_1 处理的耗水模数最高，达到 38.49%，与 CK 显著差异（$p<0.05$），其次为 WD_9；在肉质根生长期，WD_3 处理的耗水模数最高，其次为 WD_1 和 WD_4，均与 CK 显著差异；在肉质根成熟期，WD_6 处理的耗水模数最高，与 CK 无显著差异，而 WD_1 处理的耗水模数最低。菘蓝的各个生育期的耗水模数呈现出较为相似的分布规律，苗期的菘蓝由于植株矮小，生长缓慢，气温较低等原因，耗水模数在 8.97%～10.60%之间，当进入到营养生长期和肉质根生长期后，菘蓝的根冠发育迅速，气温升高，耗水模数也随着增加至 32.97%～38.49%，最后，在菘蓝的肉质根成熟期，气温降低，生长速度也逐渐下降，耗水模数也下降至 15.45%～22.22%。

2.4 调亏灌溉下菘蓝产量和水分利用效率

菘蓝产量是在营养生长期轻度水分亏缺其余生育期充分灌溉的 WD_1 处理条件下最高（达到 8 390.80 kg/hm^2），其他不同程度的水分亏缺处理均使菘蓝产量有所降低，与 CK 相比，其他各处理产量降幅在 1.04%～33.43%之间，在营养生长期轻度、肉质根生长期轻度水分调亏条件下，WD_4 处理的菘蓝产量与 CK 无显著（$p>0.05$）差异，为 8 235.32 kg/hm^2；而营养生长期重度水分亏缺和肉质根生长期中度、重度水分亏缺的 WD_3，WD_7，WD_8 和 WD_9 处理的菘蓝产量分别与 CK 差异显著（$p<0.05$），分别减产 18.29%，18.05%，31.67%和 33.43%。WD_1 处理的水分利用效率最高〔23.62 kg/(hm^2 · mm)〕，比 CK 显著提高 8.35%，WD_4 处理次之，比 CK 提高 6.74%，即营养生长期轻度水分调亏和肉质根生长期轻度水分调亏对菘蓝的水分利用效率影响显著。而其他处理的水分利用效率均有所降低，其中 WD_2，WD_3，WD_5，WD_6，WD_7，WD_8 和 WD_9 处理的水分利用效率显著低于 CK，分别降低 6.47%，9.22%，9.54%，8.17%，9.95%，20.73%和 22.48%（表 4）。结果表明菘蓝在营养生长期和肉质根成熟期的轻度水分调亏可提高其水分利用效率，而其他中度、重度水分调亏处理会明显降低水分利用效率。

3 讨论与结论

作物的全生育期内各个阶段的耗水量能够代表其各个生育期的需水特性及需求，也能够反映出不同生育阶段对水分的敏感程度。孟兆江等[7]研究表明冬小麦全生育期耗水量随水分调亏度加重而降低，降低幅度为 12.8%～46.5%。杨学军等[8]发现 4 种苔草在亏缺灌溉条件下耗水量、产量均显著降低。本试验研究结果表明水分调亏程度将会影响菘蓝全生育阶段的耗水量，且随调亏程度的增大，菘蓝的全生育阶段消耗的水量减少的愈加明显。这与黄兴法等[9]研究结果一致，与充分灌溉相比，苹果树的调亏微喷灌节约灌溉用水，同时在其生育期内的耗水量可减少 10.2%～11.2%。

表 4 不同调亏灌溉处理下菘蓝水分利用效率的影响

处理	降雨量/mm	总耗水量/mm	产量/(kg · hm^{-2})	WUE/(kg · hm^{-2} · mm^{-1})
CK	196.5	381.75	8 322.25^{a}	21.80^{b}
WD_1	196.5	355.25	8 390.80^{a}	23.62^{a}
WD_2	196.5	366.06	7 462.24^{b}	20.39^{c}
WD_3	196.5	343.62	6 800.36^{e}	19.79^{d}
WD_4	196.5	353.93	8 235.32^{a}	23.27^{a}
WD_5	196.5	357.65	7 051.11^{c}	19.72^{d}
WD_6	196.5	348.66	6 981.71^{cd}	20.02^{cd}
WD_7	196.5	347.35	6 819.79^{de}	19.63^{d}
WD_8	196.5	329.02	5 686.71^{f}	17.28^{e}
WD_9	196.5	327.78	5 539.79^{f}	16.90^{e}

邱新强等[10]研究发现不同水分处理条件下，各生育阶段内的水分胁迫使夏玉米的阶段耗水量和日耗水强度较 CK 处理均普遍降低，其中轻旱处理的降幅均最小，重旱处理的降幅最大。张步翀等[11]研究发现在小麦生长旺盛的抽穗—灌浆期，日耗水强度达到最大，此生育期属于水分较敏感时期。本试验结果表明菘蓝的耗水强度变化规律基本呈现出苗期最小（约 0.90 mm/d），肉质根成熟期次之（约 1.60 mm/d），营养生长期和肉质根生长期最大（约 3.00 mm/d）的规律，且轻度亏水处理耗水强度降幅较小，重度亏水处理降幅较大。

菘蓝的各个生育期的耗水模数呈现出较为相似的分布规律，苗期的耗水模数在 8.97%～10.60%之间，当进入到营养生长期和肉质根生长期后，菘蓝的根冠发育迅速，气温升高，耗水模数也随着增加至 32.97%～38.49%，在菘蓝的肉质根成熟期，耗水模数也下降至 15.45%～22.22%。不同水分亏缺处理间的耗水模数之间并没有随着水分亏缺程度的加剧而出现有规律的变化趋势。这主要是因为影响耗水模数的因素诸多，如耗水强度、全生育期总消耗水量、环境因子和该生育阶段持续时间长短等。

调亏灌溉不仅可以用于与果树、梨树等的节水增产，同时本研究发现对于菘蓝也具有节水增产效果。雷艳等[12]研究发现冬小麦在返青期受水分亏缺时干

物质显著降低了 7.7%,但提高了 4.95%的产量和 7.56%的水分利用效率。时学双等[13]研究发现轻度水分亏缺处理可以显著提高春青稞的水分利用效率和收获指数,而极度水分亏缺则会显著降低产量、水分利用效率和收获指数。本研究也得出相似结论,WD_4 处理的菘蓝产量与 CK 无显著($p>0.05$)差异,WD_1 处理的水分利用效率最高,WD_4 处理次之且比 CK 提高 6.74%,即 WD_4 处理为最优处理。菘蓝的经济产量受轻度水分亏缺的影响不显著,而中度和重度水分亏缺显著降低了菘蓝的经济产量。不同处理的水分利用效率受到水分亏缺的影响显著,轻度水分亏缺的水分利用效率显著增加,而其他处理的水分利用效率均有所降低。结果说明轻度水分亏缺可以有效提高菘蓝的水分利用效率,并且不会降低菘蓝的经济产量。

[参 考 文 献]

[1] 陈永金,陈亚宁,薛燕.干旱区植物耗水量的研究与进展[J].干旱区资源与环境,2004,18(6):152-158.

[2] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1):27-41.

[3] Risheng Ding, Shaozhong Kang, Yanqun Zhang, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching [J]. Agricultural Water Management, 2013, 127(1):85-96.

[4] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等.不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J].生态学报,2005,25(9):2326-2332.

[5] 白钰,唐晓清,施晟璐,等.氮营养对菘蓝生长及活性成分积累的影响[J].核农学报,2017,31(1):169-178.

[6] 国欣,胡小龙,王月荣,等.板蓝根多糖的系统分离纯化与组成分析[J].中草药,2016,47(9):1508-1514.

[7] 孟兆江,段爱旺,王景雷,等.调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段水分蒸散的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):198-202.

[8] 杨学军,武菊英,滕文军,等.负水头亏缺灌溉下 4 种苔草耗水量及抗旱性研究[J].草地学报,2011,19(4):607-611.

[9] 黄兴法,李光永,王小伟,等.充分灌与调亏灌溉条件下苹果树微喷灌的耗水量研究[J].农业工程学报,2001,17(5):43-47.

[10] 邱新强,路振广,张玉顺,等.不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J].中国农学通报,2013,29(27):68-75.

[11] 张步翀.河西绿洲灌区春小麦调亏灌溉试验研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):35-40.

[12] 雷艳,张富仓,寇雯萍,等.不同生育期水分亏缺和施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(5):167-174,180.

[13] 时学双,李法虎,闫宝莹,等.不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):144-151,265.

(上接第 166 页)

[7] 张俊巍,田荣燕,薛现凯,等.西藏拉萨地区冻融作用对溜砂坡天然休止角的影响[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(3):52-57.

[8] 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等.印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J].地学前缘,2003(3):135-148.

[9] 王艳,石荣媛,乔长录.基于模糊综合评价模型的天山北坡经济带水资源承载力评价[J].水土保持通报,2018,38(5):206-212,219.

[10] 洪海春.关(岭)海兴(义)高等级公路工程边坡稳定性分析与危险性预测[D].贵州 贵阳:贵州工业大学,2004.

[11] 洪海春,徐卫亚,叶明亮.基于模糊综合评判的边坡稳定性分析[J].河海大学学报,2005,33(5):558-559.

[12] 张勇慧,李红旭,盛谦,等.基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J].岩土力学,2010,31(10):3151-3156.

[13] 李来仕,王清,孔元元,等.基于层次分析法的灰坝桥沟泥石流危险性评价[J].路基工程,2017(1):184-188.

[14] 杨柯,张军.层次分析法在溜砂坡危险性评价中的应用[J].长春工程学院学报:自然科学版,2012,13(4):82-85.

[15] 付君宜,杨光玉.基于模糊综合评判的边坡稳定性评价[J].建材与装饰,2017(16):212-213.

[16] 孙洪,付君宜,吴斌,等.岩堆稳定性模糊综合评价方法在 FAST 工程中的应用[J].科学技术与工程,2017,17(4):281-286.