

基于水氮耦合的枸杞灌溉制度优化

马波^{1,2,3}, 田军仓^{1,2,3}

(1.宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3.教育部旱区现代农业水资源高效利用工程研究中心, 银川 750021)

摘要: 为明确一定养分条件下枸杞耗水量与产量的关系, 于2014年和2015年采用2因素3水平对比试验设计, 研究了枸杞耗水量与碱解氮消耗量耦合效应对产量的影响, 通过回归的耦合模型对基于树种、树龄、碱解氮消耗量的枸杞灌溉制度进行了优化。结果表明: (1) 相同施肥条件时, 4年树龄时HW产量最高, 为1 335.7 kg/hm², MW产量次之, 为1 174.2 kg/hm², LW产量最低, 为1 066.5 kg/hm², 5年树龄时HW产量为2 463.7 kg/hm², MW产量最高, 为2 556.1 kg/hm², LW产量最低, 为2 394.5 kg/hm²; (2) 同一灌水水平条件下2年试验均表现出中施肥水平产量最高, 高施肥水平产量次之, 低施肥水平产量最低, 4年树龄MF产量为2 758.0 kg/hm², HF产量为2 595.5 kg/hm², LF产量为2 407.0 kg/hm², 5年树龄MF产量为4 113.9 kg/hm², HF产量为3 652.3 kg/hm², LF产量为3 532.1 kg/hm²; (3) 耗水量、碱解氮消耗量耦合效应显示, 2014年产量随着耗水量的增加而增加, 而产量随碱解氮消耗量增加呈“凸”形抛物线趋势变化, 2015年产量随耗水量、碱解氮消耗量增加均呈“凸”形抛物线趋势变化。 (4) 灌溉制度优化发现1年树龄总ET_a为166.0~198.8 mm, 2年树龄总ET_a为194.7~252.5 mm, 3年树龄总ET_a为196.6~227.2 mm, 4年树龄总ET_a为173.5~221.6 mm, 5年树龄总ET_a为179.3~196.6 mm。研究结果可为1~5年树龄“宁杞1号”枸杞获得理想的产量提供灌溉制度优化参考。

关键词: 水肥耦合; 枸杞; 灌溉制度优化; 碱解氮

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0235-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.033

Optimization of Irrigation Scheduling for *Lycium barbarum* L. Based on Water and Nitrogen Coupling

MA Bo^{1,2,3}, TIAN Juncang^{1,2,3}

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Ningxia Research Center of Technology on Water-saving Irrigation and Water Resource Regulation, Yinchuan 750021; 3. Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture Ministry of Educational Engineering Research Center, Yinchuan 750021)

Abstract: In this study, the effects of irrigation and fertilizer coupling on production performance of *Lycium barbarum* L. were investigated and the irrigation scheduling was optimized based on water and nitrogen coupling. The study adopted two factors of drip irrigating water quota (W) and amount of nitrogen application (F). W included 225 (LW), 300 (MW) and 375 m³/hm² (HW), respectively, and F included 480 (LF), 629 (MF), and 777 (HF) kg/hm². There were 9 treatments combined by W and F with three levels for each: T1 (LW, LF), T2 (LW, MF), T3 (LW, HF), T4 (MW, LF), T5 (MW, MF), T6 (MW, HF), T7 (HW, LF), T8 (HW, MF) and T9 (HW, HF). The field experiments were conducted in Zhongning county, Ningxia Hui Autonomous Region, Northwest China in 2014 and 2015. The results showed that the yield increased with the increasing irrigation water quota with maximum yield of 1 335.7 kg/hm² of HW for four-year-old tree under the same fertilizer condition, the yields of MW and LW were 1 174.2 and 1 066.5 kg/hm², respectively. The maximum yield was MW by 2 556.1 kg/hm² for the five-year-old, and the yields of HW and LW were 2 463.7 and 2 394.5 kg/hm², respectively. Under the same irrigation level treatment, the yield was the highest in the MF treatment and lowest in the LF treatment for 2 years experimental results.

收稿日期: 2020-06-03

资助项目: 宁夏自然科学基金项目(NI13007); 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)项目(NXYLXK2017A03); 宁夏重点研发计划项目(2019BEH03010); 国家自然科学基金项目(51869023)

第一作者: 马波(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: slxboma-34@163.com

通信作者: 田军仓(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱地区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: slxbtjc@163.com

The yields of HF, MF and LF were 2 595.5, 2 758.0 and 2 407.0 kg/hm², respectively for the four-year-old, and 3 652.3, 4 113.9 and 3 532.1 kg/hm², respectively for the five-year-old. The results of 2 years experiments showed that yield climbed up from LF to MF and declined from MF to HF. There was no consistency of yield with irrigation water quota in 2 years experiments. We optimized the irrigation scheduling with the methods of this study, the results showed that the total *ET_a* of the one-year-old *Lycium barbarum* L. was 166.0~198.8 mm, and 194.7~252.5, 196.6~227.2, 173.5~221.6 and 179.3~196.6 mm, respectively for the two-, three-, four- and five-year-old tree. This attributed to the consumption of fertilizer and fertilizer use efficiency increased with tree-age increase, as well as the increased irrigation or fertilizer couldn't promot yield of *Lycium barbarum* L.. It is necessary that water and fertilizer should get perfect coupling. This study would be as reference of optimized irrigation scheduling of ideal yield for ‘Ningqi No.1’ with 1 to 5 years tree-age.

Keywords: water and fertilizer coupling; *Lycium barbarum* L.; irrigation scheduling optimization; alkali-hydrolyzable nitrogen

枸杞(*Lycium barbarum* L.)属茄科(*Solanaceae*)类药食同源灌木^[1],是中国西北地区重要经果林树种,其果实枸杞子药用价值高,可作为保健食品,提高人体免疫力^[2],具有滋肝、补肾、明目等功效^[3]。

水肥调控是实现作物优质高产的重要措施^[4],合理的灌溉制度和施肥方案可以充分发挥水肥协同效应,提高枸杞水肥利用效率,增加枸杞产量,减少资源浪费,避免农田环境恶化^[5-6],所以,灌溉制度与养分条件的最佳耦合对提高作物产量和水肥利用效率具有非常重要的意义^[7]。

现有灌溉制度优化方法主要有线性规划、非线性规划、动态规划^[8-9]及各种计算模型。早期方案主要是基于水量平衡方程的动态规划^[10]。吴鑫森等^[11]基于农田水量平衡模拟模型和作物产量计算模型并考虑随机降雨的影响,建立了对灌溉日期和灌溉水量进行优化的多目标优化模型;Jensen 模型和 Blank 模型是以产量最大的单一优化目标灌溉制度优化方法^[12-13];于芷婧等^[14]基于农田水量动态模拟模型和作物水分生产函数,构建了 2 种作物产量最大为目标的轮作农田灌溉制度多目标优化模型;张志宇等^[15]以水分生产函数为基础建立冬小麦—夏玉米全周期灌溉制度多目标优化模型。以产量为目标的灌溉制度优化模型除了水分生产函数外还有一些其他的模型,如 AquaCrop 模型是利用蒸腾量与归一化水分生产效率计算地上生物量,通过收获指数控制最终产量^[8];RZWQM 模型能够准确模拟农田水分和养分循环,较准确地预测不同灌水处理下作物产量差异及

土壤含水率状况^[16];ORYZA 2000 模型^[17]能够比较准确地模拟旱稻的生物量、叶面积动态变化过程及最终产量和根层土壤水分动态,尤其是在模拟穗生物量方面具有较高的准确性^[18]。

已有灌溉制度优化方法均是针对一定产量条件的水量分配,而水分对作物的作用向来不是单一的,水分生产是在一定土壤养分条件下才能实现,对于作物灌溉制度的优化如果以养分条件为基础,能以肥定水、以水促肥,达到理想的水肥耦合效应。本研究在已有研究基础上提出基于水氮耦合效应的枸杞灌溉制度优化方法,通过回归方程计算一定碱解氮消耗量和目标产量条件下的最佳需水量,进而根据初始土壤水分、作物系数(生育阶段或旬)进行灌溉制度优化,以期为基于水氮耦合条件的枸杞灌溉制度优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于 2014 年、2015 年在宁夏中宁县大战场镇东盛村(37°22'N,105°34'E)进行,大战场镇位于“中国枸杞之乡”宁夏中宁县中部,全镇面积 220.8 km²,耕地面积 1.04×10⁴ hm²,是扬黄灌溉区典型的枸杞种植区。试验区海拔 1 279 m,年平均降水量 220 mm,年水面蒸发量 2 055.3 mm,年平均气温 9.5 ℃,无霜期 168 d,年日照时间 2 979.9 h,全年太阳总辐射量 143 kJ/cm²,全年干燥度为 3.9,属温带大陆性气候。试验开始时于 2014 年 3 月 25 日测定 0—20,20—40 cm 埋深土壤初始物理、化学性质见表 1。

表 1 试验田土壤基本性质

土层深度/cm	质地	容重/(g·cm ⁻³)	田间持水率(体积分数)/%	全盐量/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	速效氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH
0—20	壤土	1.35	25.0	0.31	0.73	0.96	20.2	42.4	48.1	133.0	8.8	8.65
20—40	黏壤土	1.42	25.6	0.29	0.57	0.50	20.1	31.0	10.9	60.0	6.6	8.63

1.2 田间试验

1.2.1 试验设计 于 2014 年选取 4 年树龄(2011 年

栽植)的枸杞树在初始含水率和肥力均相近条件下连续 2 年进行了田间试验。试验设置灌水定额、施氮量

2个因素,每个因素3个水平。灌水定额3个水平分别为225,300,375 m³/hm²,施氮量3个水平分别为480,629,777 kg/hm²。田间按照每行(行距1.7 m,株距1.2 m,行长24 m)1个处理布置,完整的试验共9行,每个处理3个重复,整个试验共27行,试验区面积为45.9 m×24 m。为了试验便于管理、不受周围耕作的影响需进行一定的隔离保护,保护行处理方式和其最近的试验处理相同,设3个保护行。采用涌泉灌灌水技术,毛管为单行布置,距树干底部10 cm,每棵树用1个稳流器供水,选择的稳流器流量为8 L/h,稳流器出水口安装10 cm长、外径4 mm的导水小管,出水口位于树干底部。

1.2.2 试验过程 将枸杞年生长发育过程分为萌芽期、营养生长期、夏果花期、夏果果期、休果期、秋果花期和秋果期7个阶段,于2014年和2015年在枸杞7个生育阶段进行相应的处理及数据观测。

试验于2014年3月开始,选取前期无差异处理4年树龄的“宁杞1号”枸杞为研究对象,3月25日对田间0—20,20—40 cm埋深土壤进行“梅花状”位置随机取样,观测其初始物理、化学性质,确保其无过大差异。2014年试验于4月10日、5月25日、6月1日、6月9日、6月22日、6月30日、7月18日、7月31日按照方案设计进行了灌水,灌溉水源为沉淀后的宁夏中宁段黄河水,根据枸杞生长状况于4月6日、5月23日、6月21日、7月31日各施肥1次,3个水平施肥量依次为3 433.1(LF,含氮量487.7 kg/hm²),4 904.4(MF,含氮量648.7 kg/hm²),6 375.7 kg/hm²(HF,含氮量809.6 kg/hm²)。生育期降雨量248.6 mm,当地地下水埋深70 m,土壤为壤土,土层厚度1.4 m,由于计划湿润层设计为100 cm,故没有深层渗漏。2015年试验于4月7日、5月17日、6月7日、6月12日、6月26日、7月13日、7月23日、8月20日、9月4日按照方案设计进行了灌水,灌溉水源为沉淀后的宁夏中宁段黄河水,于4月12日、5月2日、6月8日、7月14日、9月4日各施肥1次,肥料种类与成分同2014年,3个水平施肥量依次为3 923.5(LF,含氮量472.5 kg/hm²),5 394.9(MF,含氮量608.4 kg/hm²),6 866.2 kg/hm²(HF,含氮量744.2 kg/hm²)。生育期降雨量142.9 mm。

1.3 指标测定与计算

1.3.1 气象资料观测 在试验点布置小型农田气象站 Vantage Pro2(美国 DAVIS),观测气压、气温、湿度、雨量、风速、风向、寒风指数、露点温度、体感温度、紫外线指数、太阳辐射等气象数据,对记录的数据进行采集。2年降水过程及累积降水量见图1。

1.3.2 土壤体积含水率观测 在距树干底部20 cm

位置埋设100 cm长(埋入地面以下90 cm,地面以上留10 cm)的TDR(Time-Domain Reflectometry)探管,使用IMKO(德国)生产的TRIME-PICO-IPH TDR仪器观测0—20,20—40,40—60,60—80 cm埋深土壤体积含水率,观测之前对仪器用烘干法校核。从枸杞萌芽开始7天测定1次,灌水前后、降雨后分别加测,发育阶段临界期加测。

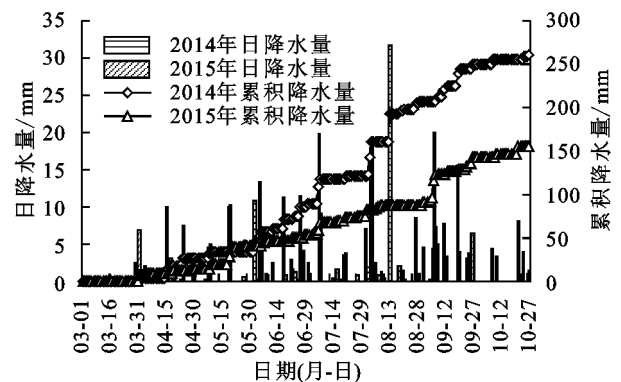


图1 降水量及累积降水

1.3.3 土壤养分观测

(1)土壤全氮测定。取距树干底部30 cm处0—60 cm埋深土壤,风干过0.25 mm筛作为待测土样。采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮,利用浓硫酸及混合催化剂在强热高温处理下水解氧化使氮素转变为铵离子,在消化好的溶液中加入氢氧化钠进行蒸馏,蒸馏出的氨液经硼酸溶液吸收,再用酸标准溶液滴定,最后由酸标准溶液消耗量计算出全氮量。

(2)土壤碱解氮测定。取距树干底部30 cm处0—60 cm埋深土壤,风干过1 mm筛作为待测土样。采用碱解扩散法测定土壤碱解氮,对土样进行水解,使易水解氮经碱解转化为氨气状态而逸出,被硼酸吸收后再用标准酸滴定,可计算出碱解氮的含量。

1.3.4 产量观测 每个处理3个重复,每个重复17棵枸杞树,每次采摘将1个重复的鲜果分为1组,将采集的鲜果自然晾晒至连续3日称量恒重计算产量,计量单位为kg/hm²。

1.4 枸杞作物系数计算

枸杞各生育阶段作物系数计算方法见公式(1):

$$K_{ci} = \frac{ET_{ai}}{ET_{oi}} \quad (1)$$

式中: K_{ci} 为第*i*阶段的作物系数; ET_{ai} 为第*i*阶段实际作物蒸发蒸腾量,即阶段耗水量(mm); ET_{oi} 为第*i*段潜在腾发量,即参考作物腾发量(mm)。

1.5 碱解氮消耗量测算

土壤碱解氮能够反映土壤氮素动态变化和供氮水平,是衡量氮素水平的重要指标,其在土壤中的含量与作物产量存在较显著的相关关系^[19-20],所以用土壤碱解氮消耗量反映氮素与枸杞产量的关系具有一

定的可靠性。土壤碱解氮主要来源于土壤已经存在的碱解氮、土壤全氮转化的碱解氮、追肥转化的碱解氮,本研究计算碱解氮方法见公式(2)。

$$N=N_{\text{initial}}+n\cdot N_{\text{total}}+m\cdot N_{\text{add}}-N_{\text{end}}\quad (2)$$

式中: N 为碱解氮消耗量(kg/hm^2); N_{initial} 为枸杞萌芽初期土壤碱解氮量(kg/hm^2); N_{total} 为枸杞萌芽初期全氮量(kg/hm^2); N_{add} 为枸杞生长过程中追施氮量(kg/hm^2); N_{end} 为阶段测产结束时碱解氮量(kg/hm^2); n 为土壤全氮转化为碱解氮的转化系数,这里参考王艳杰等^[21]研究获得的碱解氮和全氮的关系($TN=-0.0686+0.02243AN$, $r=0.984\ 4$, TN 为土壤全氮, AN 为土壤碱解氮)进行计算; m 为追肥转化为土壤碱解氮的转化系数,这里取氮肥利用系数 $0.5^{[22]}$ 。

1.6 水肥耦合模型介绍

作物生产除了受到水分、养分、光照、温度等因素的影响,多年生树木还受到树龄的影响,仅就水分和养分对作物生产来说,即有单因素影响,也有交互作用影响,这里将作物耗水量(ET_a)和碱解氮消耗量(N)作为产量

$$\left\{\begin{array}{l} N=\frac{N_{\max }(i)}{1+\exp \left(c_1+c_2 \cdot a\right)} \\ \text { NUE }=\frac{\text { NUE}_{\max }(i)}{1+\exp \left(d_1+d_2 \cdot a\right)} \\ Y_p=N \cdot \text { NUE } \\ E T_a=\frac{-\left(b_1+b_3 \cdot N\right)+\sqrt{\left[\left(b_1+b_3 \cdot N\right)^2-r \cdot b_4 \cdot\left(b_0-Y_p+b_2 \cdot N+b_5 \cdot N^2\right)\right]}}{2 b_4} \\ I_i=E T_{a i}-W_i-P_0=K_{c i} \times E T_a-W_i-P_0 \end{array}\right.$$

品种代码

基于枸杞品种、树龄的碱解氮消耗量

碱解氮生产效率

预期产量

目标函数

优化函数

(4)

式中:枸杞品种代码(i)取 1,5,7 和 9 分别代表“宁杞 1 号”“宁杞 5 号”“宁杞 7 号”和“宁杞 9 号”; $N_{\max }(i)$ 为品种代码 i 的枸杞最大碱解氮消耗量(kg/hm^2); $\text{NUE}_{\max }(i)$ 为品种代码 i 的枸杞最大碱解氮生产效率(kg/kg); c_1 、 c_2 、 d_1 和 d_2 为参数; I_i 为 i 阶段灌水量(mm); W_i 为 i 阶段初计划湿润层土壤储水量(mm); P_0 为 i 阶段有效降水量(mm);其他符号意义同前。

2 结果与分析

2.1 耗水过程分析

枸杞萌芽期由于叶面积指数较小,枝条遮阴影响微弱,该时期枸杞耗水以土壤蒸发为主,该阶段 2014 年、2015 年持续时间分别为 21,20 天, ET_a 值还受到土壤本身水分的影响,2014 年 T8、T9 相对较高,T3、T4 相对较低,2015 年 T6 最高(表 2)。营养生长期,枸杞耗水量有所增加,但 ET_a 平均值与萌芽期较为接近,2014 年这 2 个阶段各处理平均 ET_a 值分别为 0.68,0.51 mm/d ,2015 年分别为 0.99,0.95 mm/d 。夏果花期枸杞耗水量明显增加,各处理 ET_a 值也有

形成因素建立水肥生产函数,见公式(3)。

$$Y=b_0+b_1 \cdot E T_a+b_2 \cdot N+b_3 \cdot E T_a \cdot N+b_4 \cdot E T_a^2+b_5 \cdot N^2\quad (3)$$

式中: Y 为枸杞干果产量(kg/hm^2); ET_a 为枸杞实际耗水量(mm); N 为碱解氮消耗量(kg/hm^2); b_0 、 b_1 、 $\cdots$ 、 b_5 为无量纲系数。

1.7 灌溉制度优化方法

产量的形成是一个复杂的过程,在一定气象、地理位置和土壤质地条件下,枸杞产量除了与耗水量、可利用养分量有关外,还与枸杞品种、树龄等因素有关,全面考虑一个系统的枸杞灌溉制度是一个复杂的问题,本研究针对所选定的枸杞品种(i),基于树龄(a)计算枸杞碱解氮消耗量(N)和碱解氮生产效率(NUE),进而计算预期产量(Y_p),然后根据耦合模型反算枸杞 ET_a 值,最终根据作物系数优化灌溉制度。多年生作物耗肥量与肥料生产效率均与树龄有关,这里用 Logistic 方程^[23]描述其与树龄的关系,具体优化方法见公式(4)。

品种代码

基于枸杞品种、树龄的碱解氮消耗量

碱解氮生产效率

预期产量

目标函数

优化函数

(4)

所差异($P<0.01$)。夏果期枸杞耗水量达到最大,从试验结果来看,除 2015 年 T9 处理外 2 年观测的其他处理夏果期枸杞耗水量均高于 100 mm ,该阶段耗水模数 2014 年为 22.5%,2015 年为 28.3%。2014 年休果期和秋果花期持续时间较长,为 32,31 天,2015 年仅为 15,17 天,所以 2014 年休果期和秋果花期 ET_a 值高于 2015 年。秋果期整体 ET_a 有所降低,日耗水量均较低,2014 年为 0.9 mm/d ,2015 年为 1.1 mm/d 。

2.2 作物系数分析

从表 3 作物系数统计结果来看,2 年试验同一生育期各处理作物系数均存在显著的差异($P<0.01$)。枸杞萌芽期和营养生长期作物系数相对较小,这是由于这 2 个阶段温度较低、叶面积指数较小,枸杞耗水主要以蒸发为主,进入夏果花期,枸杞作物系数明显增大,最大发生在夏果期,休果期枸杞作物系数有所降低,秋果花期开始有所上升。由于秋果期持续时间较长,枸杞作物系数有所增加。

从表 3 还可看出,2015 年枸杞各生育阶段作物系数比 2014 年小,原因在于枸杞从萌芽开始至枸杞

夏果结束,2015 年日平均气温较 2014 年低 0.9 ℃,造成实际耗水量减少,导致作物系数变小。

表 2 枸杞各生育阶段耗水量 单位:mm

年份	处理号	萌芽期	营养生长期	夏果花期	夏果期	休果期	秋果花期	秋果期
2014	T1	10.8eE	14.5deDE	91.0gG	116.1gG	65.5eE	58.3dD	49.4bB
	T2	10.7eE	15.2dD	89.4hH	111.9hH	46.7hG	56.0fE	61.8aA
	T3	5.6hH	9.5gF	91.5fF	107.5iI	64.3fF	53.2hG	41.2dD
	T4	6.1gG	12.5fE	104.4eE	120.1fF	75.3cC	62.9aA	49.3bB
	T5	14.0dD	19.1dD	105.7dD	128.8cC	64.2fF	54.1gF	42.9cC
	T6	20.7cC	22.1cC	104.5eE	125.9eE	63.9gF	49.1iH	33.9fE
	T7	9.2fF	12.9efE	119.9aA	127.5cC	77.6bB	60.4bB	42.7cC
	T8	26.5aA	28.9aA	119.1bB	135.0aA	68.9dD	60.0cC	49.6bB
	T9	26.1bB	25.5bB	117.1cC	134.9bB	79.9aA	56.9eE	34.1eE
2015	T1	21.5dC	37.7cC	60.8fF	131.0bB	21.8gG	24.7gG	51.4gG
	T2	18.3eD	32.1dD	55.6gG	112.8dD	24.4fF	27.7fF	53.9eE
	T3	17.2fE	30.0eE	59.5hH	111.3eE	26.4eE	29.9eE	52.8fF
	T4	16.8gF	29.3fF	68.0dD	113.3cC	30.8dD	34.9dD	61.6bB
	T5	10.2hG	17.9gG	65.1eE	113.3cC	39.4aA	44.6aA	78.8aA
	T6	26.0aA	45.5aA	60.9fF	136.1aA	26.3eE	29.8eE	52.7fF
	T7	18.6eD	32.5dD	73.5bB	107.5fF	30.9dD	35.0cC	54.4dD
	T8	24.2cB	42.4bB	75.4aA	113.3cC	32.8cC	37.1bB	57.4cC
	T9	25.9bA	30.4eE	70.4cC	95.0gG	33.2bB	37.6bB	48.2hH

注:表中同列数字后不同小写字母表示 $P<0.05$ 显著性水平;不同大写字母表示 $P<0.01$ 显著性水平。下同。

表 3 枸杞各生育阶段作物系数

年份	处理号	萌芽期	营养生长期	夏果花期	夏果期	休果期	秋果花期	秋果期
2014	T1	0.122eE	0.087fF	0.464dD	0.596fF	0.285gG	0.526cC	0.561bB
	T2	0.121eE	0.091eE	0.456dD	0.575gG	0.393fF	0.505eE	0.702aA
	T3	0.064gG	0.057iI	0.467dD	0.552hH	0.460cC	0.480gG	0.468eE
	T4	0.069gG	0.075hH	0.533cC	0.617eE	0.392fF	0.567aA	0.559cC
	T5	0.158dD	0.115dD	0.539cC	0.662bB	0.390fF	0.488fF	0.487dD
	T6	0.234cC	0.132cC	0.533cC	0.647dD	0.474bB	0.443hH	0.385fF
	T7	0.105fF	0.077gG	0.612aA	0.655cC	0.421dD	0.545bB	0.485dD
	T8	0.300aA	0.173aA	0.608aA	0.694aA	0.488aA	0.542bB	0.563bB
	T9	0.295bB	0.153bB	0.598bB	0.693aA	0.412eE	0.513dD	0.387fF
2015	T1	0.296cC	0.227cC	0.286fF	0.459bB	0.282hH	0.271cB	0.263fE
	T2	0.230fF	0.176gF	0.320dD	0.398cC	0.399eE	0.384abAB	0.316bB
	T3	0.255dD	0.196dD	0.346bB	0.377eE	0.400dD	0.385abAB	0.279dD
	T4	0.252dD	0.193eD	0.262hH	0.396cC	0.316gG	0.304bcAB	0.276dD
	T5	0.141gG	0.108Hg	0.306eE	0.398cC	0.510aA	0.491bcAB	0.404aA
	T6	0.333bB	0.255bB	0.355aA	0.397cC	0.424cC	0.408bAB	0.295cC
	T7	0.236eE	0.181fE	0.280gG	0.390dD	0.342fF	0.329abcAB	0.271eD
	T8	0.357aA	0.274aA	0.286fF	0.477aA	0.341fF	0.328abcAB	0.270eD
	T9	0.356aA	0.183fE	0.331cC	0.333fF	0.430bB	0.413aA	0.247gF

2.3 灌水、施肥水平对枸杞产量影响

由图 2 可知,同一施肥条件下,2014 年 HW 处理产量最高,MW 产量次之,LW 产量最低,从 6 月 21 日(第 1 次采摘)至 7 月 11 日(采摘 5 次),LW 处理产量为 1 066.5 kg/hm²,MW 处理产量为 1 174.2 kg/hm²,HW 处理产量为 1 335.7 kg/hm²,自枸杞萌芽开始枸杞日形成产量依次为 9.0,9.7,10.8 kg/(d·hm²),而 2015 年前 5 次 3 种灌水水平枸杞累积产量较为接近,6 月 13 日(第 1 次采摘)至 7 月 5 日(采摘 5 次),LW 产量最低,为 2 394.5 kg/hm²,MW 产量最高,为 2 556.1 kg/hm²,HW 产量为 2 463.7 kg/hm²,自枸杞萌芽开始枸杞日形

成产量依次为 21.6,23.0,22.2 kg/(d·hm²)。2015 年枸杞产量增加的原因在于:随着树龄的增加,树冠有所增大,相应的施肥量也需要增加,2015 年各处理平均碱解氮消耗量增加 146.7kg/hm²,加之 2015 年累积温度比 2014 年低 71.7 ℃(2014 年 2 018.4 ℃,2015 年 1 946.7 ℃),2014 年过高的温度会增加枸杞植株腾发量,影响枸杞产量形成。

由图 3 可知,同一灌水水平时,2014 年 MF 处理产量最大,为 2 758.0 kg/hm²,HF 次之,为 2 595.5 kg/hm²,LF 最小,为 2 407.0 kg/hm²;同样,2015 年 MF 处理产量也最高,为 4 113.9 kg/hm²,HF 处理次之,为

3 652.3 kg/hm², LF 处理最小, 为 3 532.1 kg/hm²。2014 年自枸杞萌芽开始枸杞日形成产量依次为 9.8, 12.1, 11.2 kg/(d · hm²), 2015 年自枸杞萌芽开始枸杞日形成产量依次为 20.8, 24.4, 21.6 kg/(d · hm²), 结果与一定养分条

件下对应同水平灌水日形成产量较为接近。从 2 年的试验结果来看, 高水平施肥并未形成最高产量。可见, 水肥耦合没有达到最佳效应, 要获得较为理想的枸杞产量, 还需进行灌溉制度和施肥方案优化。

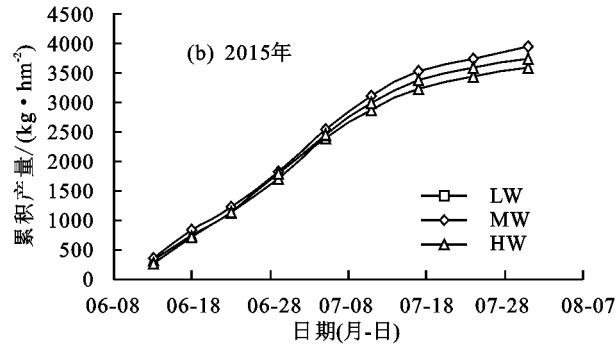
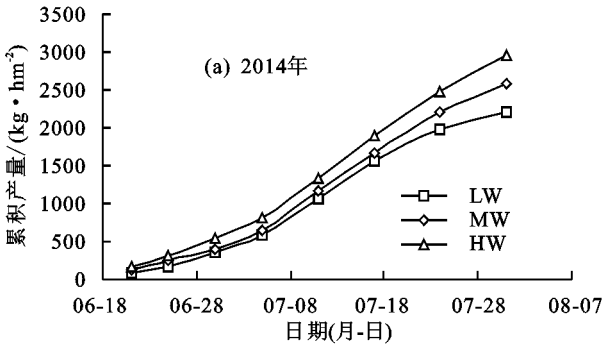


图 2 灌水对枸杞产量的影响

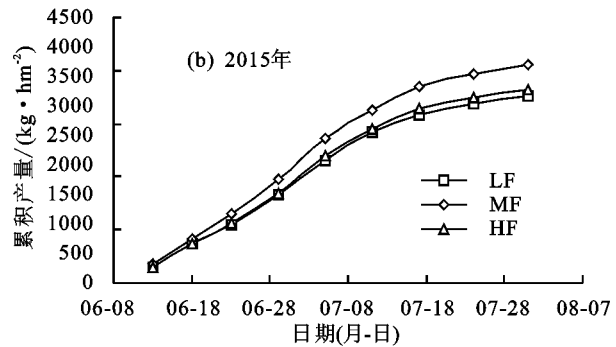
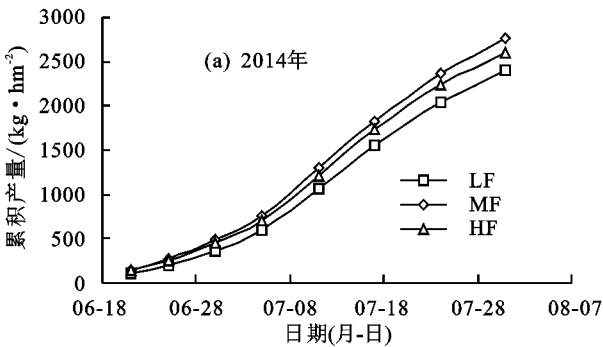


图 3 施肥对枸杞产量影响

2.4 碱解氮消耗量、碱解氮利用效率计算方法确定

对土壤养分吸收利用状况能够反映作物生产力的强弱研究^[24]发现, 1~5 年和 10 年以上枸杞田土壤养分含量较高, 而 6~9 年枸杞田土壤养分含量较少, 所以将枸杞生产力根据树龄可以分为 3 个阶段, 即 1~5 年为生产力上升阶段, 6~9 年为生产力稳定阶段, 10 年以上为枸杞生产力衰减阶段。本文研究了 4 年、5 年枸杞养分利用和氮素利用效率, 虽未获得最大碱解氮消耗量 ($N_{\max}(i)$) 和最大碱解氮利用效率 ($NUE_{\max}(i)$), 这里根据经验增长百分比进行计算获得 6 年树龄“宁杞 1 号”的碱解氮消耗量 (N) 和碱解氮利用效率 (NUE), 依次为各自最大值进行计算, 获得相应的参数。根据公式 (4) 用 Logistic 方程回归得到碱解氮消耗量 (N) 和碱解氮生产效率 (NUE) 计算式, 见图 4。

2.5 水肥耦合模型分析

用 Excle 对 2014 年和 2015 年试验结果进行回归分析, 结果见公式 (5) 和公式 (6)。

2014 年: $Y = -10459.400 + 34.170ET_a + 12.980N - 0.021ET_a \cdot N + 0.004ET_a^2 - 0.003N^2$ (5)

2015 年: $Y = -42223.300 + 177.223ET_a + 40.248N - 0.048ET_a \cdot N - 0.259ET_a^2 - 0.011N^2$ (6)

式 (5) 和式 (6) 中符号意义同式 (3)。

对回归方程进行显著性检验, 2014 年决定系数 $R^2 = 0.889 4$, 拟合度较高; $F = 4.825 5$, $P = 0.112 7$, 说明回归关系达到较显著水平, 证明建立的回归模型有一定的可靠性, t 检验各因素均不显著。2015 年决定系数 $R^2 = 0.854 2$, 拟合度较高; $F = 3.514 4$, $P = 0.164 9$, 说明回归关系达到较显著水平, 证明建立的回归模型有一定的可靠性, t 检验发现常数项、 ET_a 一次项、 N 一次项和 N 的二次项显著。

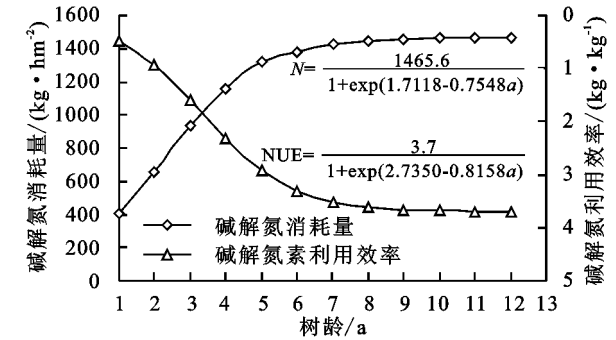
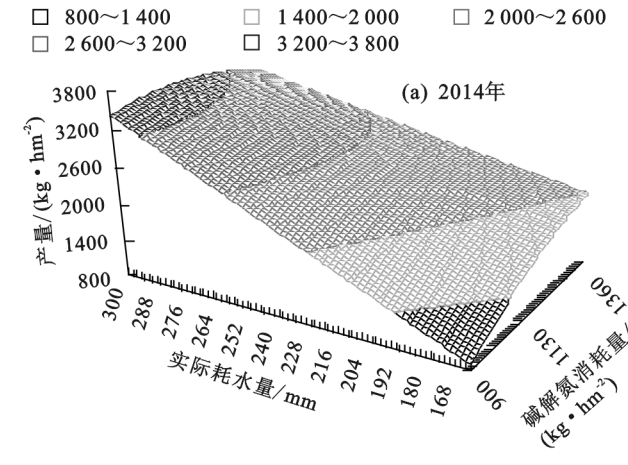


图 4 “宁杞 1”号枸杞不同树龄碱解氮消耗量及利用效率

2 年的回归模型存在较大差异, 这是因为枸杞是多年生植物, 其水分及养分生产效率均受到树龄的影响, 将在以后的研究中进一步分析。

不同水肥条件耦合效应见图 5。从图 5 可以看出, 2014 年产量随着耗水量的增加而增加, 而产量随碱解氮消耗量的增加呈“凸”抛物线趋势变化。2015

年在耗水量与2014年接近的条件下,但产量随耗水量增加呈“凸”抛物线趋势变化,可见,过多的水分反而会造成产量降低,产生这种结果的可能在于随着树



龄的增加,枸杞需要更多的养分,如果一定养分条件下,过多灌水会造成养分下渗,进而表现出减产,但过多的养分也会造成减产,原因如前所述。

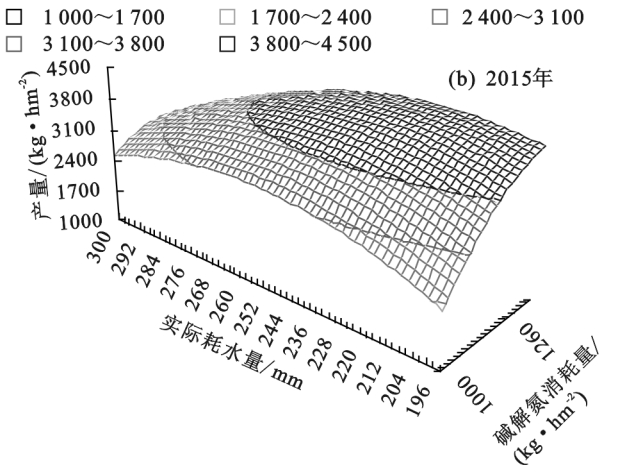


图5 水—碱解氮耦合效应

2014年实际耗水量 ET_a 达到300 mm,碱解氮消耗量为1 000 kg/hm²时会达到最大产量3 456.0 kg/hm²,而2015年实际耗水量 ET_a 为214 mm,碱解氮消耗量为1 380 kg/hm²时产量最大为4 426.8 kg/hm²,可见,2014年产量没有达到最大。由于2014年枸杞从萌芽开始至枸杞夏果结束日平均气温为19.8℃,而2015年该阶段日平均气温为18.9℃,可见较之2015年,2014年多余的 ET_a 主要用于维持枸杞生长发育的蒸腾和土壤蒸发,对枸杞产量贡献不大,故本研究基于水肥耦合的灌溉制度优化采用2015年的回归方程进行灌溉制度优化。

2.6 灌溉制度优化

基于试验结果,选取“宁杞1号”品种枸杞对1~5年树龄(i)进行灌溉制度优化。由图4不同树龄(a)所对应的理论碱解氮消耗量设定碱解氮消耗量(N),根据图4不同树龄枸杞碱解氮利用效率(NUE)计算预期产量(Y_p),再根据公式(4)目标函数计算一定产量对应的枸杞总需水量(ET_a)。根据计算的枸杞作物系数进行归一化处理,然后再按照各生育阶段作物系数对计算所得到的枸杞总需水量(ET_a)进行水量分配,获得各生育阶段枸杞需水量(ET_{ai}),计算结果见表4,最终根据土壤水分和有效降水计算阶段灌溉定额。

表4 灌溉制度优化结果

树龄/ a	碱解氮消耗量 N / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	碱解氮利用效率 $\text{NUE}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	目标产量 Y_p / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	作物需水量 ET_a/mm	萌芽期	营养生长期	夏果花期	夏果期
					归一化作物系数			
					0.148	0.113	0.322	0.418
1	300.0	0.5	150.0	166.0	24.5	18.8	53.4	69.3
	400.0	0.5	189.4	181.3	26.8	20.5	58.3	75.7
	500.0	0.5	250.0	198.8	29.4	22.5	63.9	83.0
	500.0	0.9	460.8	194.7	28.8	22.0	62.6	81.3
2	600.0	0.9	540.0	215.4	31.8	24.4	69.3	90.0
	700.0	0.9	630.0	252.5	37.3	28.6	81.2	105.4
	700.0	1.6	1120.0	227.2	33.6	25.7	73.1	94.9
	800.0	1.6	1280.0	236.5	34.9	26.8	76.0	98.8
3	900.0	1.6	1427.1	196.6	29.0	22.3	63.2	82.1
	900.0	2.3	2070.0	221.6	32.7	25.1	71.3	92.5
	1000.0	2.3	2300.0	192.4	28.4	21.8	61.9	80.3
	1100.0	2.3	2530.0	173.5	25.6	19.6	55.8	72.5
4	1100.0	2.9	3190.0	196.6	29.0	22.3	63.2	82.1
	1200.0	2.9	3480.0	184.2	27.2	20.9	59.2	76.9
	1300.0	2.9	3770.0	179.3	26.5	20.3	57.6	74.9

表4计算出了“宁杞1号”枸杞不同树龄不同碱解氮消耗量的阶段需水量,最终可根据式 $I_i = ET_{ai} - W_i - P_0$ 在考虑土壤水分以及降水状况下进行灌水定额计算,可实现基于水氮耦合条件的枸杞灌溉制度优化。

3 讨论

灌溉制度是基于一定作物条件和气象条件的水分调控措施,多年来学者基于作物产量为目标的灌溉制度研究众多,以产量为目标、根据土壤水分或稻田

水层深度进行灌水调节,但作物生长发育过程不单是要调控水分,还受到土壤养分的影响,而且养分也是一个十分复杂的因素,传统意义的养分主要是指氮、磷、钾、有机质以及土壤盐分,而广义的养分还包括很多微量元素,既有金属元素,也有非金属元素。土壤养分对作物的作用是在一定水分条件下的,而水分对作物产量、品质的影响也是在一定养分条件下。土壤氮素对枸杞产量具有直接的影响,枸杞产量的形成对土壤水分、氮素的响应历来受到学者的关注,本研究将枸杞耗水量、碱解氮消耗量作为 2 个因素,研究这 2 个因素耦合效应对枸杞产量的影响,2014 年和 2015 年试验结果差异较大,这是因为除了 2014 年和 2015 年气象因素有所差异以外,作为多年生植物的枸杞,试验结果还会受到树龄、树冠分布、初始水分以及初始养分的影响。2014 年枸杞从萌芽期开始到夏果期结束积温 $2\,536.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水量 122 mm ,灌溉定额 $135.5\sim 193.5\text{ mm}$,初始土壤碱解氮 504.8 kg/hm^2 ,而 2015 年该时段积温 $2\,595.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水量 75 mm ,灌溉定额 $145.2\sim 218.1\text{ mm}$,初始土壤碱解氮 $575.7\sim 928.4\text{ kg/hm}^2$ 。2015 年枸杞平均产量比 2014 年高 43.1% 。2 年耗水量 ET_a 计算结果相近,而理论消耗碱解氮 2015 年比 2014 年高 12.7% 。2014 年由于生育期日平均气温较高(2014 年日平均气温 $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,2015 年日平均气温 $18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$),过多耗水 ET_a 用于维持枸杞生长的蒸腾和土壤蒸发,这就造成用于枸杞产量形成的水分不足,所以水肥耦合效应表现出枸杞产量随耗水量的增大而增加。2015 年日平均气温较低,水分能够过多地用于枸杞产量形成,而过多的水分反而造成枸杞减产,所以水肥耦合效应中枸杞耗水量、碱解氮消耗量均表现出“凸”抛物线形态。在基于一定树龄碱解氮利用率条件下计算预期产量,利用本研究提出的灌溉制度优化方法对 1~5 年树龄“宁杞 1 号”进行灌溉制度优化,优化结果 ET_a 均小于试验结果,可以将此结果用于后续试验进行进一步有关研究。

4 结论

(1)枸杞夏果期耗水量最大,4 年、5 年树龄枸杞夏果期耗水量均高于 100 mm ,该阶段 2 个树龄耗水模数分别为 22.5% 和 28.3% 。秋果期日耗水量 4 年树龄为 0.9 mm/d ,5 年树龄为 1.1 mm/d 。

(2)4 年树龄枸杞产量随灌水水平提高而增加,耗水量为 $206.7, 247.3, 273.8\text{ mm}$ 时枸杞产量分别为 $1\,066.5, 1\,174.2, 1\,335.7\text{ kg/hm}^2$,5 年树龄枸杞产量随灌水水平提高呈先增加后减小的趋势,耗水量为 $190.6, 223.7, 265.5\text{ mm}$ 时枸杞产量分别为 $2\,394.5, 2\,556.1, 2\,463.7\text{ kg/hm}^2$ 。4 年、5 年树龄枸杞产量均为中施肥水平最大,4 年树龄碱解氮消耗量为 $992.5,$

$1\,153.5, 1\,314.4\text{ kg/hm}^2$ 时枸杞产量分别为 $2\,448.7, 2\,805.8, 2\,640.5\text{ kg/hm}^2$,5 年树龄碱解氮消耗量为 $1\,101.9, 1\,302.1, 1\,496.7\text{ kg/hm}^2$ 时枸杞产量分别为 $3\,532.1, 4\,113.9, 3\,652.3\text{ kg/hm}^2$ 。

(3)用 Excle 对试验结果进行耗水量、碱解氮消耗量耦合与产量关系回归分析,耦合效应显示 2014 年产量随着耗水量的增加而增加,而产量随碱解氮消耗量增加呈“凸”抛物线趋势变化,2015 年产量随耗水量、碱解氮消耗量增加均呈“凸”抛物线趋势变化。

(4)基于水氮耦合枸杞灌溉制度优化结果为 1 年树龄总 ET_a 为 $166.0\sim 198.8\text{ mm}$,2 年树龄总 ET_a 为 $194.7\sim 252.5\text{ mm}$,3 年树龄总 ET_a 为 $196.6\sim 227.2\text{ mm}$,4 年树龄总 ET_a 为 $173.5\sim 221.6\text{ mm}$,5 年树龄总 ET_a 为 $179.3\sim 196.6\text{ mm}$ 。

参考文献:

- [1] Wozniak J R, Swannack T M, Butzler R, et al. River inflow, estuarine salinity, and Carolina wolfberry fruit abundance: Linking abiotic drivers to Whooping Crane food[J]. Journal of Coastal Conservation, 2012, 16(3): 345-354.
- [2] 李云翔,柯英,罗健航,等.宁夏主要枸杞产地土壤环境质量现状与评价[J].中国土壤与肥料, 2016(2): 21-26.
- [3] 杨孟可,李建领,刘赛,等.宁夏枸杞对枸杞瘿螨为害的内源激素响应及外源水杨酸对枸杞瘿螨的影响[J].应用生态学报, 2020, 31(7): 2307-2313.
- [4] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90.
- [5] Li Q Q, Bian C Y, Liu X H, et al. Winter wheat grain yield and water use efficiency in wide-precision planting pattern under deficit irrigation in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 153: 71-76.
- [6] Bai Z H, Lu J, Zhao H, et al. Designing vulnerable zones of nitrogen and phosphorus transfers to control water pollution in China[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(16): 8987-8988.
- [7] 魏廷邦,柴强,王伟民,等.水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J].中国农业科学, 2019, 52(3): 428-444.
- [8] 宋健,李江,杨奇鹤,等.基于 AquaCrop 和 NSGA-II 的灌溉制度多目标优化及其应用[J].水利学报, 2018, 49(10): 1284-1295.
- [9] Singh A. An overview of the optimization modelling applications[J]. Journal of Hydrology, 2012, 466/467: 167-182.
- [10] 孙晋锴,冯跃华,张子敬,等.基于多年降水的豫东地区夏玉米灌溉制度优化[J].节水灌溉, 2017(11): 38-41.
- [11] 吴鑫森,王晶,郗志红.基于多年降雨资料的作物灌溉制度多目标优化[J].农业机械学报, 2013, 44(4): 108-112.
- [12] Jensen M E. Water consumption by agricultural plants [M]. New York: Academic Press INC, 1968.

[13] 王颖辉,汤鹏程,李曙光,等.内蒙古东部干旱年份玉米需水规律及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):108-114.

[14] 于芷婧,尚松浩.华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J].水利学报,2016,47(9):1188-1196.

[15] 张志宇,郗志红,吴鑫森.冬小麦—夏玉米轮作体系灌溉制度多目标优化模型[J].农业工程学报,2013,29(16):102-111.

[16] 周始威,胡笑涛,王文娥,等.基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J].农业工程学报,2016,32(6):121-129.

[17] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA 2000: Modeling lowland rice[M].Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute,2003.

[18] 薛昌颖,杨晓光,邓伟,等.应用 ORYZA2000 模型制定北京地区旱稻优化灌溉制度[J].农业工程学报,2008,24(4):76-82.

[19] 张水清,林杉,郭斗斗,等.长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系[J].中国土壤与肥料,2017(6):23-29.

[20] 马忠明,王平,陈娟,等.适量有机肥与氮肥配施方可提高河西绿洲土壤肥力及作物生产效益[J].植物营养与肥料学报 2016,22(5):1298-1309.

[21] 王艳杰,付桦.雾灵山地区土壤有机质全氮及碱解氮的关系[J].农业环境科学学报,2005,24(增刊 1):85-90.

[22] 巨晓棠.氮肥有效率的概念及意义:兼论对传统氮肥利用率的误解[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.

[23] 科斯特·梅纳德.应用 Logistic 回归分析[M].李俊秀译.上海:格致出版社,2012.

[24] 李锋,李银坤.基于 GIS 与地统计学宁夏枸杞主产区不同树龄土壤肥力特征研究[J].北方园艺,2017(24):134-143.

(上接第 225 页)

[26] 华青措.不同坡向高山嵩草草甸地上生物多样性及土壤因子变化[J].青海草业,2016,25(1):5-8.

[27] 吴艳芹,程积民,白于,等.坡向对云雾山典型草原枯落物分解特性的影响[J].草地学报,2013,21(3):460-466.

[28] 徐娟,余新晓,席彩云.北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2009,23(3):189-193.

[29] 潘刚,任毅华,边巴多吉,等.西藏色季拉山急尖长苞冷杉林枯枝落叶及苔藓层的生物量与持水性能[J].水土保持研究,2008,15(5):81-83,87.

[30] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: The effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. Hydrological Processes,2004,18(16):3007-3018.

[31] 金雅琴,李冬林,孙丽娟,等.南京近郊人工林地表枯落物的累积量及持水性[J].中国水土保持科学,2018,16(5):95-104.

[32] 喻阳华,李光容,皮发剑,等.赤水河上游主要森林类型水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2015,29(2):150-156.

[33] 许文盛,王一峰,童晓霞,等.紫鹊界梯田区植被凋落物水资源调配特性[J].水土保持学报,2013,27(4):130-135.

(上接第 234 页)

[22] Wu Q, Wang Y Z, Chen T T, et al. Soil nitrogen regulation using clinoptilolite for grain filling and grain quality improvements in rice[J].Soil and Tillage Research, 2020,199:104547.

[23] 吴奇.斜发沸石对水稻节水增产及控氮机理研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.

[24] Sah R N, Mikkelsen D S. Availability and utilization of fertilizer nitrogen by rice under alternate flooding[J]. Plant and Soil,1983,75(2):221-226.

[25] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002(9):1095-1103.

[26] 张聪智.生物炭对设施菜地土壤氮素缓控效应研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2015.

[27] 张星,张晴雯,刘杏认,等.施用生物炭对农田土壤氮素转化关键过程的影响[J].中国农业气象,2015,36(6):709-716.

[28] Wang M M, Zhou Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J].Environmental Chemistry,2013,32(5):768-780.

[29] Deluca T H, Mackenzie M D, Gundale M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J].Soil Science Society of America Journal,2006,70(2):448-453.

[30] 王思源,申健,李盟军,等.不同改性生物炭功能结构特征及其对铵氮吸附的影响[J].生态环境学报,2019,28(5):1037-1045.

[31] Chu J, Xue J H, Jin M J, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non point source pollution[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014,30(4):409-415.

[32] 高海英.一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[33] Khan M A, Kim K W, Mingzhi W, et al. Nutrient-impregnated charcoal: An environmentally friendly slow-release fertilizer [J]. The Environmentalist, 2008, 28(3):231-235.