

# 高寒区低温水灌溉春青稞根层水分特征分析

关迦文<sup>1,3</sup>, 何 军<sup>2</sup>, 徐 冰<sup>3</sup>, 刘 伟<sup>1,3</sup>, 汤鹏程<sup>3</sup>, 李泽坤<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 西藏自治区水文水资源勘测局山南分局, 西藏 山南 856000;

3. 中国水利水电科学研究院 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘 要:** 低温融雪水是高寒区重要的灌溉水源, 青稞是一种很重要的高原谷类作物。为明确高寒区融雪水灌溉春青稞根层水分运移, 进一步阐明低温融雪水灌溉对春青稞根系生长影响。通过低温水灌溉对照试验定量分析了灌水温度降低对地温及青稞生长变化, 基于氢氧稳定同位素示踪方法, 对比分析了关键生育期灌水前后作物根区水分来源变化, 明晰低温融雪水灌溉春青稞根层水分稳定氢氧同位素分布特征。通过关键生育期水分贡献率的研究得到了低温水灌溉春青稞用水策略。在低温融雪水灌溉条件下, 青稞根系对灌溉水利用效果随温度降低而降低。随灌水温度的上升, 青稞主要吸水根深对应的土层土壤水分贡献比例增加。随灌水温度梯度的上升, 主要吸水根深对应的土层水分贡献比例越大, 建议尽量在 18 时(相当于 WT3 处理)进行融雪水灌溉, 从灌水时间角度避免低温水灌溉产生的寒害影响。

**关键词:** 融雪水; 灌溉; 青稞; 稳定氢氧同位素; 高寒区

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)04—0048—07

## Water Characteristics Analysis of Spring Highland Barley Root Layer Irrigated with Low Temperature Water in High and Cold Region

GUAN Jiawen<sup>1,3</sup>, HE Jun<sup>2</sup>, XU Bing<sup>3</sup>, LIU Wei<sup>1,3</sup>, TANG Pengcheng<sup>3</sup>, LI Zekun<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Neimenggu, 010018, China;

2. Tibet Hydrology and Water Resources Shannan Administrative Area Branch, Shannan, Xizang 856000, China;

3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot, Neimenggu 010020, China)

**Abstract:** Low temperature snow melting water is an important irrigation water source in alpine region, and highland barley is a very important cereal crop in plateau. In order to clarify the water movement in the root layer of spring barley irrigated by snowmelt water in alpine region and further analyze the effects of low-temperature snow melting water irrigation on the root growth of spring barley. Through the contrast experiment of low temperature water irrigation, the change of soil temperature and barley growth caused by the decrease of irrigation temperature was quantitatively analyzed. Based on the hydrogen and oxygen stable isotope tracer, the water source changes of crop root zone before and after irrigation in key growth period were compared and analyzed, and the stable hydrogen and oxygen isotope distribution characteristics of spring highland barley root layer water under low temperature snow melting water irrigation were clarified. Through the research of water contribution rate in key growth period, the water use strategy of low temperature water irrigation for spring highland barley was obtained. Under the condition of low temperature snow melting water irrigation, the effect of highland barley roots on irrigation water conservancy decreased with the decrease of tempera-

收稿日期: 2020-04-20

修稿日期: 2020-05-16

基金项目: 水资源与水电工程国家重点实验室开放基金项目(2018NSG01); 中国水利水电科学研究院科研专项(MK2020J04); 国家自然科学基金项目(51579158; 51609154)

作者简介: 关迦文(1996—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究工作。E-mail: 1457270831@qq.com

通讯作者: 徐 冰(1979—), 男, 内蒙古包头人, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉研究工作。E-mail: nmxbing@163.com

ture. With the increase of irrigation temperature, the proportion of soil water contribution corresponding to the main water absorption root depth of highland barley increased. With the increase of irrigation temperature gradient, the greater the proportion of soil water contribution corresponding to the main root depth of water absorption. It is suggested that snow melting water irrigation should be carried out at 18:00 to avoid the cold damage caused by low-temperature water irrigation from the angle of irrigation time.

**Keywords:** snowmelt water; irrigation; barley; stable hydrogen and oxygen isotopes; alpine region

融雪水是西藏地区的重要灌溉水源,然而由于西藏高海拔地区辐射高、气压低、氧含量少,加之土层稀薄,冷热交换在近地层十分频繁,低温融雪水利用不当容易对作物造成寒害<sup>[1]</sup>。高山融雪水经过较短距离输水进入土壤后水温仍较低,低温水会在一定程度上降低作物的根系活性,进而影响根系生长发育致使作物减产<sup>[2]</sup>。西藏地区全区60%的播种面积种植的是青稞,所以青稞是西藏地区主要的粮食作物,属于典型的特需口粮<sup>[3]</sup>。藏区粮食安全问题尤其青稞的栽培种植技术推广和品种繁育等问题一直以来备受各界关注<sup>[4]</sup>。

在土壤-植物-大气连续体(SPAC)中,植物对不同水源的选择和利用能力可利用氢氧稳定同位素的分布特征反映,通过分析植物木质部中的水及各类水分来源中的同位素组成就可对植物的水分利用来源进行判断<sup>[5]</sup>。全球范围内的专家借助于较为成熟的氢氧同位素研究方法剖析了不同生态系统中水的运移规律,并取得了一定的成果<sup>[5-6]</sup>。半干旱黄土高原区0~120 cm土层供给了铁杆蒿和荆条全生育期所需75%~80%的水分<sup>[7-8]</sup>。氢氧稳定同位素技术已被应用于落叶松<sup>[9]</sup>、柠条<sup>[10]</sup>及棉花<sup>[11]</sup>等的水分利用来源及用水策略的研究<sup>[12]</sup>。树木在河岸生态系统中的水分来源,其中小部分来自于河水,大部分的来源为地下水<sup>[13]</sup>;植物在荒漠生态系统中,可通过测定植物木质部在不同水源条件下的氢氧同位素,得出不同水分来源对荒漠植物的贡献率<sup>[14]</sup>;冬小麦和夏玉米在农田生态系统中,可利用稳定氢氧同位素分布特征,估算主要吸水深度在不同生长期的变化<sup>[15-16]</sup>。

西藏地区早春时节(4月—5月)在雨季尚未来临且没有其他灌水来源前提下,采用融雪水自流漫灌作为春播作物的出苗水,由于灌水温度较低(3℃~5℃),致使多年生作物返青延缓、一年生作物出苗率低等现象<sup>[17-19]</sup>。而且各土层水分传递变化滞后于相应土层温度的变化<sup>[20]</sup>。土体温度主要受大气温度和太阳净辐射量的影响<sup>[21]</sup>。因此,本研究针对西藏高寒区在春季利用低温融雪水漫灌这一独特生

产方式,结合现有试验条件,以春青稞-藏青2000为研究对象,采用稳定氢氧同位素示踪法,以期揭示低温水灌溉春青稞根层水分运移及分布规律<sup>[22]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于中国科学院拉萨农业生态试验站,该地属高原季风温带半干旱气候区。年平均大气温度为7.7℃,最高月平均气温出现在7月为16.3℃,最低月平均气温出现在12月为-1.5℃,无霜期120 d~130 d。一年内降雨时间分配不均,年均降雨量425 mm。雨季为6月中旬至9月下旬,降水量为400 mm左右,占全年降水量九成以上,常为夜间降雨。多年平均蒸发量1 166 mm。冲积、洪积母质是该地土壤母质主要成分,质地比较沙,土壤质地为粉砂壤土,土层偏薄。大块石砾常出现在20 cm以下,土壤密度1.41 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率22%,pH值7.2。

### 1.2 试验设计

试验处理:试验材料为春青稞-藏青2000,该品种春性中晚熟,生育期125 d~135 d,穗长方型,四棱,长齿芒,小穗密度中等。穴播,播深1.5 cm~2.0 cm,每桶15穴~18穴,每穴人工点播播种2粒~3粒。播种至收获时间为2018年4月20日至2019年9月20日。追施尿素187.5 kg/hm<sup>2</sup>在出苗后。桶栽单元采用直径32 cm的PVC桶,底部以打孔铁皮封底,桶高50 cm,顶部设铁丝连接以利于称质量。桶中分层填入原状土,底部20 cm为大块石砾,上部20 cm为粉砂壤土,预留10 cm以利于灌水和降雨入渗。桶壁外侧包裹保温棉,降低太阳直射对桶体温度变化的影响<sup>[23]</sup>。

低温水灌溉组设置3个温度水平:分别以灌水当日上午9时(WT1)、中午12时(WT2)、下午18时(WT3)进行灌水操作,以此作为低温水灌溉灌水处理的3个温度水平。低温水灌溉春青稞桶栽试验示意图见图1。测定并记录每次灌水时的灌水日期、灌水量见表1,灌水温度如表2所示。

1.3 测定内容及方法

气象数据:试验田附近自设的气象站自动采集记录气温、降雨量、湿度、太阳辐射、大气压等数据。生育期内气温以及渠水温度变化见图 2。

降水与灌溉水在被青稞根系吸收之前需要经过入渗等复杂过程,最终以土壤水的形式被根系吸收利用<sup>[24]</sup>。青稞茎干水的氢氧稳定同位素值是在雨水与灌溉水发生同位素分馏作用后的同位素混合值<sup>[25]</sup>。因此,研究将不同深度的土壤水作为青稞根系的吸水水源,避免了直接将雨水与灌溉水作为潜在水源进行水分贡献率分析而导致分析结果出现的

较大误差<sup>[26]</sup>。



图 1 低温水灌溉春青稞桶栽试验示意图

表 1 低温水灌溉春青稞试验灌水时间与灌水量

| 生育期    | 苗期<br>(04-20—<br>05-05) | 分蘖期<br>(05-06—<br>05-25) |       | 拔节期<br>(05-26—<br>07-01) |       | 抽穗期<br>(07-01—<br>08-05) |       | 灌浆期<br>(08-06—<br>08-30) |       | 成熟期<br>(08-31—<br>09-20) |
|--------|-------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|
| 灌水日期   | 04-20                   | 05-06                    | 05-24 | 05-31                    | 06-10 | 06-25                    | 07-15 | 08-10                    | 08-20 |                          |
| 灌水量/mm | 10                      | 15                       | 25    | 25                       | 25    | 25                       | 25    | 25                       | 25    |                          |

表 2 低温水灌溉春青稞试验各处理灌水温度

| 灌水日期   |     | 04-20 | 05-06 | 05-24 | 05-31 | 06-10 | 06-25 | 07-15 | 08-10 | 08-20 |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 灌水温度/℃ | WT1 | 3.6   | 4.0   | 5.8   | 3.8   | 8.8   | 9.2   | 9.4   | 10.2  | 11.7  |
|        | WT2 | 8.3   | 12.2  | 14.6  | 15.2  | 15.8  | 15.1  | 10.8  | 14.5  | 16.6  |
|        | WT3 | 12.1  | 15.4  | 16.8  | 17.2  | 17.6  | 20.5  | 21.6  | 22.6  | 24.7  |

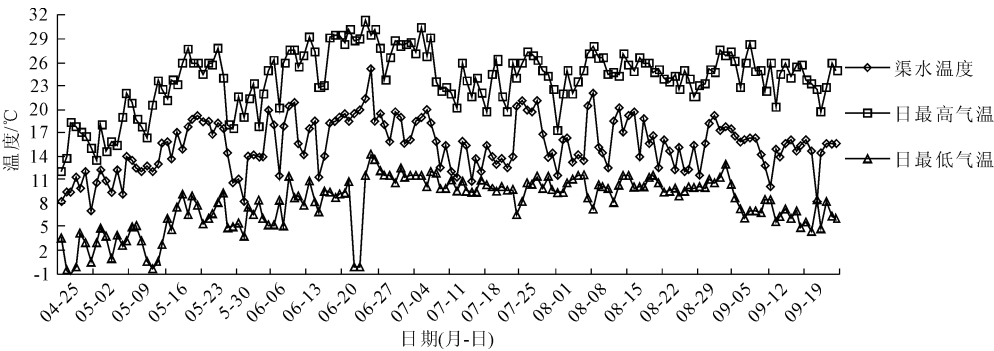


图 2 生育期内气温以及渠水温度变化图

在整个生育期内分别于 7 月 1 日、7 月 30 日、8 月 10 日、9 月 10 日灌水前后进行 4 次取样。研究区的土壤层很薄(20 cm ~ 30 cm),而在下层则可见砾石。因此,土壤剖面分为 5 层,从地面向下每 5 cm 为一层,同位素值是每个测量深度的水样的平均值。采用小型土钻取样,以防破坏桶栽青稞土壤结构。同时采集两份不同的土壤,其中一份将进行含水率检测,另一份将放入玻璃瓶内,对其进行密封后存储,避免春青稞出现气化现象<sup>[27-28]</sup>。将随机选取植株进行研究,截取离地面 2 cm 的不含叶绿素的植株茎秆,并将其密封存储至 4 mL 西林瓶内,采用三个不同的密封袋进行冷藏存储,避免春青稞水汽蒸

发。利用取样品完成灌溉春青稞样本采集,将其密封存储至 4℃ 冷藏柜内。用保温装置将春青稞样品运回实验室内进行真空处理,并提取土壤水样与植株水样,准备 0.22 μm 滤纸和 2 mL 检测瓶进行研究<sup>[29]</sup>。利用 Picarro L2140-i 超高精度液态水与水汽同位素分析仪测定该试验水样同位素<sup>[30]</sup>。

1.4 数据处理

研究春青稞的根系在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的吸水深度<sup>[31]</sup>。一种方法是直接对比,对比土壤水氢氧稳定同位素剖面与春青稞茎水同位素值,认为与茎水同位素值相近的土壤水所在的剖面深度为春青稞根系的主要吸水深度<sup>[32]</sup>。另一种方

法是对同位素质量守恒进行多元分析<sup>[33]</sup>。因为桶栽试验,不考虑地下水,而且研究区土层较薄(20 cm~30 cm),下层可见砾石,故将土壤剖面分成 5 个层次:0~5 cm、5 cm~10 cm、10 cm~15 cm、15 cm~20 cm、20 cm~25 cm,每层测量深度水样的平均值为该层同位素值。五个层次土壤水的混合为农作物茎水,由水量平衡和同位素质量守恒可得到:

$$\delta_{x_i} = f_1\delta_{x1} + f_2\delta_{x2} + f_3\delta_{x3} + f_4\delta_{x4} + f_5\delta_{x5} \quad (1)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = 1 \quad (2)$$

式中: $f_1$ 至 $f_4$ ,分别表示 5 个层次土壤水对根系吸水的贡献和 $\delta_{x1}$ 至 $\delta_{x5}$ 表示相应的氢氧稳定同位素值, $\delta_{x_i}$ 表示农作物茎水的氢氧稳定同位素值。利用同位素质量守恒进行多元分析一般会得到多个解。Philips 等针对性地提出了确定各种可能水分来源比例范围的方法。该方法是用一个很小的增量检验各种水分来源的所有可能,将同位素值与真实值相比,如果满足一个小的容差就被认为是一种可能的

组合。最后得到各可能水源的贡献比例范围用频次直方图表示,某水源在满足要求的组合次数用直方图的纵坐标表示<sup>[34-36]</sup>。

采用 Iso Source 软件并结合 Sigma Plot 14.0 作图。分析氢氧稳定同位素试验数据,确定不同土层水分的贡献率。该软件为多源线性混合模型,其原理是按照指定的增量范围叠加运算出所有可能的百分比组合,组合数量为:

$$N = \frac{\left[\frac{100}{i} + (s - 1)\right]!}{(100/i)!(s - 1)!} \quad (3)$$

式中:组合数量是 $N$ ;增量是 $i$ ;水分来源数量是 $s$ 。可行的解是每组合的加权平均值与混合物实际测定的同位素值比较后处于给定的容差范围内的组合。把所有可行解对各层土壤水贡献百分比出现的频率进行分析,得出各土层水分可能的贡献比例范围,以频率直方图表示,见图 3。

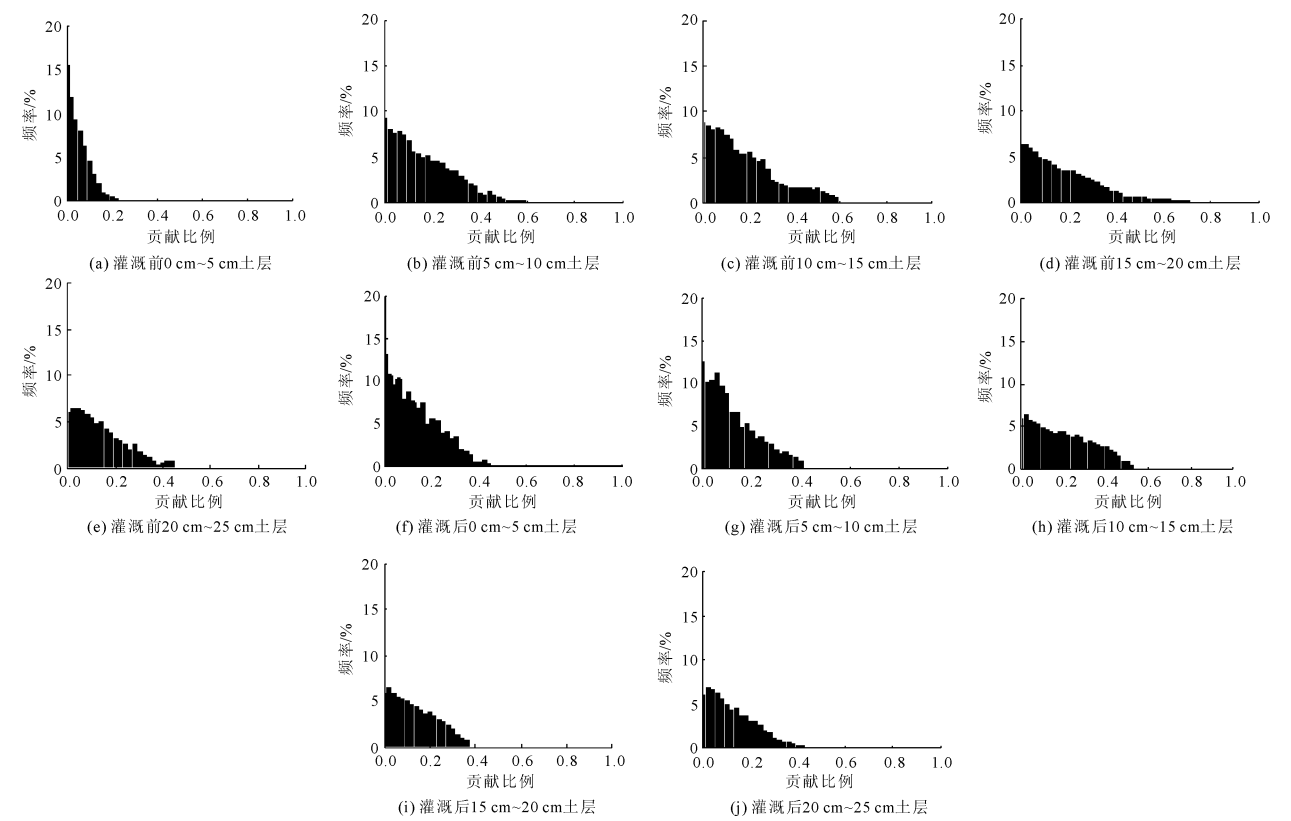


图 3 不同土层深度土壤水对春青稞根系吸水贡献率的频率直方图

## 2 结果与分析

### 2.1 全生育期青稞根层水分稳定氢氧同位素分布

7 月 10 日青稞的水分氢氧同位素在根层剖面分布如图 4 所示。各处理根系主要吸水层为植物水样同位素与同位素剖面的交点。

直接对比法排除了农作物体内水分为不同层次的土壤水混合而成的可能,只可以得到农作物的主要吸水深度。同位素质量守恒的多元分析方法可以提供各水分来源的可能组合以及某深度土层对根系吸水的贡献比例。利用 Iso Source 软件计算 5 个层次土壤水对农作物根系吸水的贡献比例范围。做出

某研究层次土壤水满足条件的所有可能组合的频次直方图,如果直方图呈收敛形状,则认为直方图的分布范围为该深度土层对根系吸水的贡献比例范围,土层对根系吸水贡献比例的最大可能值为收敛区域内频次极值对应的数值。

由图 4 氢同位素剖面可知:7 月 10 日 WT1 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~ 10 cm 和 10 cm ~ 15 cm;7 月 10 日 WT2 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~ 10 cm 和 10 cm ~ 15 cm;7 月 10 日 WT3 处理灌前吸水深度为 15 cm ~ 20 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~

10 cm;灌水后吸水深度较灌水前吸水深度变浅,分析可知:因灌水改变了浅层土壤(0 ~ 15 cm)的含水率,使得浅层根系成为主要吸水部分。

同理,7 月 30 日 WT1 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~ 10 cm;7 月 30 日 WT2 处理灌前吸水深度为 15 cm ~ 20 cm,灌后吸水深度为 10 cm ~ 15 cm 和 15 cm ~ 20 cm;7 月 30 日 WT3 处理灌前吸水深度为 15 cm ~ 20 cm 和 20 cm ~ 25 cm,灌后吸水深度为 10 cm ~ 15 cm 和 15 cm ~ 20 cm。

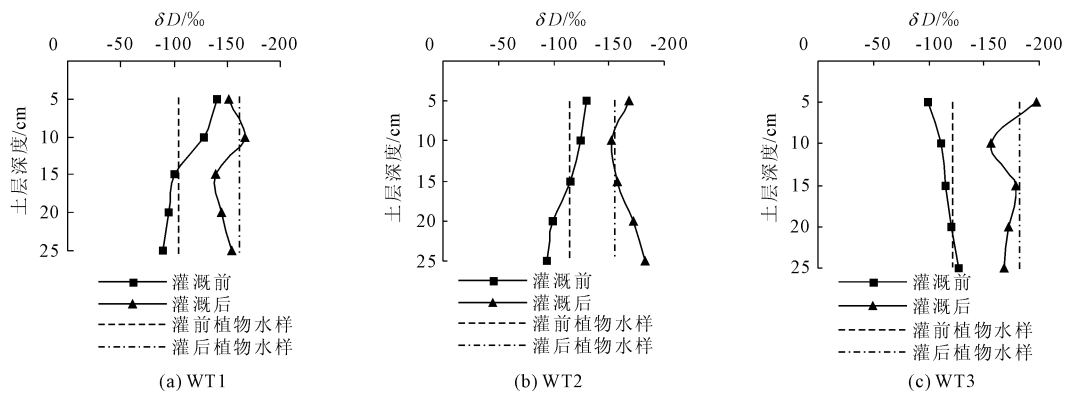


图 4 7 月 10 日青稞根层水分稳定氢氧同位素剖面分布

8 月 10 日 WT1 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm 和 15 cm ~ 20 cm,灌后吸水深度为 10 cm ~ 15 cm;8 月 10 日 WT2 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm,15 cm ~ 20 cm 和 20 cm ~ 25 cm,灌后吸水深度为 10 cm ~ 15 cm 和 15 cm ~ 20 cm;8 月 10 日 WT3 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~ 10 cm;整体来看,灌水后吸水深度较灌水前吸水深度变浅,说明灌水改变了浅层土壤(0 ~ 15 cm)的含水率,此时浅层根系作为主要吸水根系。

8 月 30 日 WT1 处理灌前吸水深度为 15 cm ~ 20 cm 和 20 cm ~ 25 cm,灌后吸水深度为 10 cm ~ 15 cm;8 月 30 日 WT2 处理灌前吸水深度为 10 cm ~ 15 cm 和 15 cm ~ 20 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~ 10 cm 和 15 cm ~ 20 cm;8 月 30 日 WT3 处理灌前吸水深度为 5 cm ~ 10 cm、10 cm ~ 15 cm 和 15 cm ~ 20 cm,灌后吸水深度为 5 cm ~ 10 cm;整体来看灌水后吸水深度较灌水前吸水深度变浅,是由于灌水带来的浅层土壤(0 ~ 15 cm)水分含量上升,使得浅层根系成为主要吸水根系。

2.2 低温水灌溉春青稞用水策略

利用 Iso Source 软件分析各土层青稞在滴灌条件下用水的贡献率。获得低温水灌溉前后根层水分对春青稞根系吸水贡献比率统计情况见表 3。

表 3 统计了青稞根层在低温水灌溉前后不同深度土壤水的贡献率。表层土壤水贡献率较小,其他根层土壤贡献率比较接近。

从贡献率的最大值分析,灌溉前 WT1、WT2、WT3 处理 15 cm ~ 20 cm 深度贡献率最大,灌溉后 WT1、WT2 处理 10 cm ~ 15 cm 深度贡献率最大。灌溉前植物水、土壤水  $\delta D$  比率基本都在相应处理的贡献率峰值深度处出现交会,数据和图表均说明,灌溉前青稞根系吸收水分来源较多的集中于 20 cm 左右;灌溉后,植物水、土壤水  $\delta D$  比率 则在 10 cm、15 cm 分别交会,并且贡献率的最大值也出现在这 2 层土壤中,说明灌溉后,青稞根系吸收水分的来源较多集中在 10 cm 和 15 cm。

根据不同处理的灌水后根层水分贡献表现可以看出,3 个处理灌水后的主要的水分贡献根层深度均较灌前有上升趋势。且随着灌水温度的持续降低,主要的水分贡献根层深度随之上升。WT3 处理灌水后主要利用的水分来自浅层(5 cm ~ 15 cm)土壤。进一步证明了低温水会改变青稞根层水分利用情况。结合当地土壤条件可以知道,沙壤土保水性较壤土等更差,由于比热容较小且浅层土壤受辐射得影响,导致浅层土壤水分更易蒸发,更容易出现干旱情况。这也是低温水灌溉导致青稞的减产的可能原因。

表 3 根层不同深度土壤水贡献率

| 处理  | 根层深度<br>/cm | 灌溉前贡献率 |     |      | 灌溉后贡献率 |     |      |
|-----|-------------|--------|-----|------|--------|-----|------|
|     |             | 平均值    | 最小值 | 最大值  | 平均值    | 最小值 | 最大值  |
| WT1 | 0 ~ 5       | 0.07   | 0   | 0.28 | 0.16   | 0   | 0.48 |
|     | 5 ~ 10      | 0.15   | 0   | 0.58 | 0.14   | 0   | 0.58 |
|     | 10 ~ 15     | 0.17   | 0   | 0.62 | 0.21   | 0   | 0.72 |
|     | 15 ~ 20     | 0.22   | 0   | 0.78 | 0.26   | 0   | 0.68 |
|     | 20 ~ 25     | 0.20   | 0   | 0.70 | 0.24   | 0   | 0.62 |
| WT2 | 0 ~ 5       | 0.06   | 0   | 0.26 | 0.14   | 0   | 0.52 |
|     | 5 ~ 10      | 0.18   | 0   | 0.60 | 0.20   | 0   | 0.54 |
|     | 10 ~ 15     | 0.20   | 0   | 0.66 | 0.21   | 0   | 0.62 |
|     | 15 ~ 20     | 0.17   | 0   | 0.68 | 0.20   | 0   | 0.62 |
|     | 20 ~ 25     | 0.18   | 0   | 0.52 | 0.21   | 0   | 0.50 |
| WT3 | 0 ~ 5       | 0.06   | 0   | 0.26 | 0.11   | 0   | 0.44 |
|     | 5 ~ 10      | 0.20   | 0   | 0.62 | 0.22   | 0   | 0.54 |
|     | 10 ~ 15     | 0.20   | 0   | 0.58 | 0.23   | 0   | 0.52 |
|     | 15 ~ 20     | 0.17   | 0   | 0.70 | 0.20   | 0   | 0.38 |
|     | 20 ~ 25     | 0.17   | 0   | 0.46 | 0.17   | 0   | 0.42 |

3 讨 论

春青稞不同生长期根系吸水深度使用直接对比法和同位素质量守恒多元分析模型会得到基本上是一致的结论,但后者通过定量地描述各种水源的比例组合,减小了由观察者的偏差导致错误的可能性。同位素剖面分布变化趋势明显,或各深度同位素值变化范围大是两种方法应用的前提。伴随灌溉引起的土壤水分垂向运动,青稞根区主要吸水深度由灌水前(15 cm ~ 20 cm)变为灌水后(5 cm ~ 10 cm),整体呈现上升趋势;随灌水温度的降低,上升趋势减缓(WT1 灌水后 10 cm ~ 15 cm,WT3 灌水后为 5 cm ~ 10 cm)。低温水灌溉较常温水灌溉会直接导致青稞根区土壤温度降低,间接影响青稞根系吸水及生长发育。低温水灌溉条件下,青稞浅层根区(5 cm ~ 10 cm)吸水比例降低,而灌溉水主要集中在 5 cm ~ 10 cm 土层,说明青稞根系对灌溉水利用效果随温度降低而降低。随灌水温度的上升,青稞主要吸水根深对应的土层土壤水分贡献比例增加(WT1 处理 0.54,WT3 处理 0.72)。相较于常温水灌溉,低温水灌溉减少作物干物质累积、降低株高、抑制作物长势等。融雪水春灌建议以少量多次为原则,灌水尽量在地温较高时到达田间,最大程度避免融雪水寒害影响。

4 结 论

(1) 低温水灌溉条件下,根系吸水活跃程度在

灌前以深层根系(20 cm 左右)为主,灌后以浅层根系(10 cm)为主说明青稞根系对灌溉水利用效果随温度降低而降低。

(2) 灌溉前,青稞根系吸收水分基本集中于 20 cm;灌溉后,植物水、土壤水  $\delta D$  比率则分别在 10 cm、15 cm 交会,并且相对应贡献率的最大值,因此灌溉后青稞根系吸收水分多集中于此。

(3) 低温水灌溉条件下,青稞浅层根区(5 cm ~ 10 cm)吸水比例降低,而灌溉水主要集中在 5 cm ~ 10 cm 土层,说明青稞根系对灌溉水利用效果随温度降低而降低。因此,融雪水灌溉建议尽量在日地温较高时进行,可从灌水时间角度避免低温水灌溉产生的寒害影响。

参考文献:

[1] 汤鹏程,徐 冰,李泽坤,等. 西藏高寒区低温融雪水灌溉研究进展与展望[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):1029-1034.

[2] 孙小平. 盐渍土试验研究进展与相关问题探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):147-152.

[3] 徐 冰,汤鹏程,李 奇,等. 基于 CROPWAT 模型的拉萨地区燕麦优化灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究,2015(6):35-39.

[4] 徐 冰,邬佳宾,郭克贞,等. 西藏牧区生态水利研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2012(3):84- 86.

[5] Matthias S, Hannes L, Katharina G, et al. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes [J]. Reviews of Geo-

- physics, 2016, 54(3):674-704.
- [6] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi ~ arid Loess Plateau[J]. Science of The Total Environment, 2017, 609:27-37.
  - [7] Jia G D, Liu Z Q, Chen L X, et al. Distinguish water utilization strategies of trees growing on earth-rocky mountainous area with transpiration and water isotopes[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(24):10640-10651.
  - [8] Wu H W, Li J, Zhang C C, et al. Determining root water uptake of two alpine crops in a rainfed cropland in the Qinghai Lake watershed: first assessment using stable isotopes analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 215.
  - [9] 朱珊娟, 肖薇, 张弥, 等. 加拿大温带落叶林生态系统氢氧同位素组成研究[J]. 生态学报, 2017, 37(22):7539-7551.
  - [10] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 基于较大降水事件的人工固沙植被区植物水分来源分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4):1053-1060.
  - [11] 李惠, 梁杏, 刘延锋, 等. 基于氢氧稳定同位素识别干旱区棉花水分利用来源[J]. 地球科学, 2017, 42(5):843-852.
  - [12] 吕婷. 黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
  - [13] Snyder K A, Williams D G. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105:227-240.
  - [14] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 等. 柴达木盆地诺木洪地区 5 种优势荒漠植物水分来源[J]. 生态学报, 2014, 34(21):6277-6286.
  - [15] 王晶晶. 土壤作物系统中水分及其氢氧稳定同位素的动态与农田耗水特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
  - [16] 徐红梅, 郑和祥. 河套灌区畦灌畦田规格对灌水效果影响的模拟分析[J]. 价值工程, 2018, 37(15):11-14.
  - [17] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 模拟增温对青藏高原高寒草甸根系生物量的影响[J]. 生态学报, 2016, 21:6812-6822.
  - [18] 程满金, 白明照, 申利刚, 等. 灌溉水温对高寒地区水稻的影响及增温措施[J]. 东北水利水电, 2000(8):19-21, 54.
  - [19] 李志刚. 低温水灌溉对花生生长发育和产量的影响[J]. 乡村科技, 2017(5):58-59.
  - [20] 黄雪峰, 张沛然, 杨校辉, 等. 盐渍土盐胀特性与水热状态变化特征试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6):184-189.
  - [21] 陈波, 田慧会, 孟祥传, 等. 气候作用下红黏土边坡湿热迁移特性及数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2):61-67.
  - [22] 余绍文, 张溪, 段丽军, 等. 氢氧稳定同位素在植物水分来源研究中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5):1-6.
  - [23] 苏春宏. 参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ )的初步检验实验及输入因子的响应分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
  - [24] 徐庆, 王婷, 高德强. 碳氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环研究中的应用[J]. 林业科学研究, 2019, 32(6):130-136.
  - [25] 李玉庆, 蒙强, 刘静霞, 等. 多因子胁迫下的西藏高原青稞生长动力学模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2):1-8.
  - [26] 余绍文, 张溪, 段丽军, 等. 氢氧稳定同位素在植物水分来源研究中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5):1-6.
  - [27] 李玉庆, 蒙强, 张存, 等. 不同水肥作用下西藏青稞生长动力学机制与模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4):17-24.
  - [28] 杜俊杉, 马英, 胡晓农, 等. 基于双稳定同位素和 Mix-SIAR 模型的冬小麦根系吸水来源研究[J]. 生态学报, 2018, 38(18):6611-6622.
  - [29] 邬佳宾, 苗澍, 徐冰, 等. 滴灌紫花苜蓿根层水分稳定同位素特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7):14-17, 27.
  - [30] 王鹏, 宋献方, 袁瑞强, 等. 基于氢氧稳定同位素的华北农田夏玉米耗水规律研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(3):481-491.
  - [31] 何文寿, 何进勤, 郭瑞英. 宁夏引黄灌区春小麦不同生育期吸收氮、磷、钾养分的特点[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(6):789-796.
  - [32] 刘利华, 费良军, 朱红艳. 水温对滴灌土壤水分入渗特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(2):166-173.
  - [33] 徐庆, 冀春雷, 王海英, 等. 氢氧碳稳定同位素在植物水分利用策略研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2009, 22(4):41-46.
  - [34] 李继荣, 次仁德吉, 次顿, 等. 西藏青稞碳、氢、氧、氮同位素在不同生态域中差异性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(17):5786-5790.
  - [35] 吴骏恩, 刘文杰, 朱春景. 稳定同位素在植物水分来源及利用效率研究中的应用[J]. 西南林业大学学报, 2014, 34(5):103-110.
  - [36] 徐英德, 汪景宽, 高晓丹, 等. 氢氧稳定同位素技术在土壤水研究上的应用进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):1-9, 15.