

# 不同深度土壤水分对黄淮海封丘地区 小麦的贡献\*

张丛志<sup>1</sup> 张佳宝<sup>1†</sup> 张辉<sup>2</sup>

(1 封丘农田生态系统国家试验站,土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(2 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,南京 210014)

**摘要** 作物水源是土壤—植物—大气连续体(Soil Plant Atmosphere Continuum, SPAC)中水分循环及节水农业的重要研究方面。传统方法很难确定不同水源对作物的贡献。本研究通过封丘地区冬小麦田间试验和稳定性氢氧同位素技术,建立了线性混合模型和  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线的耦合模型,并采用该耦合模型计算了各水源对各生育期冬小麦的贡献。结果表明:各水源对冬小麦的贡献随着生育期的变化而变化。分蘖、返青和拔节期冬小麦的主要水源为表层土壤水,且对各层土壤水分的利用随着深度的增加而减少;在孕穗期,冬小麦对 80 cm 处土壤水利用最多;开花期 80 和 180 cm 处土壤水是冬小麦的重要水源;乳熟期 40 和 80 cm 土壤水分分别贡献了 47.5% 和 39.5%。地下水在孕穗期和开花期对冬小麦的贡献较大,分别为 9.0% 和 16.4%。

**关键词** 水源;冬小麦;稳定氢同位素;稳定氧同位素;耦合模型

**中图分类号** S314 **文献标识码** A

早期研究表明水分在植物根系吸收和茎秆中转移时不发生氢氧同位素分馏<sup>[1]</sup>。因此植物茎秆水分同位素带有所利用水源的信息。植物水源一般为降雨、土壤水、地下水等,这些不同水源由于物理化学作用产生的分馏而具有不同的氢氧同位素组成<sup>[2-5]</sup>,因此对比植物水分与其各水源的氢氧同位素组成,就可以确定植物所利用的水源。稳定氢氧同位素曾广泛应用于植物水分利用研究<sup>[1,6-14]</sup>,但这些研究主要集中于树木及草原等生态系统,很少涉及农田作物,且大部分研究只定性分析各种水源对植物的贡献。定量研究多采用线性混合模型,但该模型难于确定多种水源(大于 3 种)的贡献。Thorburn 和 Walker<sup>[8]</sup>采用  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线研究了 2 种水源的情况,并认为该方法同时耦合了氢、氧同位素信息,其结果更为准确,但是该模型也无法应用于定量界定 3 种以上水源。而传统方法一般是采用水分分布或植物根系分布来确定作物水源<sup>[15-16]</sup>,但水分分布只能说明该水源可利用水分的多少,而植物根系一般会贯穿整个土壤剖面,且根系吸水活性受许多因素影响<sup>[17-18]</sup>。实际上作物

在其生长过程中利用的水源有多种,传统方法难以定性分析植物水源,进行定量研究更是存在许多缺陷。

冬小麦是我国华北黄淮海平原的重要粮食作物,其水分来源包括地下水和土壤水(不同层次)。冬小麦对不同水源的消耗不仅是土壤—植物—大气连续体(Soil Plant Atmosphere Continuum, SPAC)中的重要组成部分,也是节水农业的重要研究内容。因此,本研究以黄淮海封丘地区典型农田和典型作物冬小麦为研究对象,建立了线性混合模型和  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线的耦合模型,对冬小麦各生育期所利用的水源进行了定量计算,旨在进一步推进农田生态系统的水分循环研究,并为我国节水农业的发展提供理论基础和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验小区设在中国科学院封丘农田生态系统国家试验站。该站位于黄河北岸的河南省封

\* 国家自然科学基金项目(41001128)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB100506)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX2-EW-N-08)资助

† 通讯作者, E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介:张丛志(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事作物生理生态、土壤物理研究。E-mail: czhang@issas.ac.cn

收稿日期:2011-07-01;收到修改稿日期:2011-12-09

丘县(北纬 35°01', 东经 114°24'), 地处黄淮海平原, 属于半干旱半湿润季风气候。多年平均降雨量为 615 mm, 且 60%~90% 分布在 5 月至 10 月, 年平均气温为 13.9 °C。土壤为黄河沉积物上发育的潮

土, 属于黄淮海地区典型土壤。土壤剖面呈层状结构, 按国际制其中 0~30 cm 为砂质壤土, 30~80 cm 为粉砂质黏土, 80~170 cm 为壤质砂土, 其理化性质如表 1 所示。

表 1 试验田土壤的理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of the soil in the studied field

| 深度<br>Depth<br>(cm) | 土壤质地<br>Soil texture | 粒径分布<br>Particle size (g kg <sup>-1</sup> ) |         |        | 有机碳含量<br>Organic carbon<br>content<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 容重 Bulk<br>density<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | 电导率 Electric<br>conductivity<br>(μS cm <sup>-1</sup> ) | 饱和含水量<br>Saturated volumetric<br>water content<br>(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) |
|---------------------|----------------------|---|---------|--------|---|---|--|---|
|                     |                      | <2 μm                                       | 2~50 μm | >50 μm |   |   |  |   |
| 0~30                | 砂质壤土 Sandy loam      | 137   | 407     | 456    | 7.4   | 1.55  | 118.1  | 0.415   |
| 30~80               | 粉砂质黏土 Silt clay      | 359   | 558     | 84.0   | 14.3  | 1.41  | 173.7  | 0.475   |
| 80~170              | 壤质砂土 Loam sand       | 103   | 824     | 73.0   | 3.6   | 1.47  | 186.4  | 0.452   |

## 1.2 试验设计

试验小区设置 3 个重复。每个小区长 8 m, 宽 6 m, 周围被 1 m 深水泥挡板隔离, 该挡板深入地下 80 cm 并高出地面 20 cm。每个小区埋设 1 根中子管, 采用中子仪(型号为 CNC 503)从土壤表面至 180 cm 深每隔 10 cm 测定土壤体积含水率; 每个小区安装 4 根土壤水分提取器(ceramic suction cups), 根据土壤质地设计其埋深分别为 20、40、80、180 cm; 其中一小小区埋设 PVC (Polyvinyl Chloride, 直径为 5 cm) 管至 8 m 深, 用于监测地下水位和采集地下水样。其中, 土壤体积含水率和地下水位每 5 d 测定一次(越冬时为 10 d)。土壤水分提取时间和冬小麦植株采样时间一致。此外, 试验小区东面 10 m 左右为试验站小型气象站, 可以测定每次降雨量。

冬小麦(试验品种为郑麦 9023)于 2007-10-16 播种, 并于 2008-05-31 收获。进行采样的各生育期分别为: 分蘖期(2007-12-03)、返青期(2008-03-01)、拔节期(2008-03-25)、孕穗期(2008-04-10)、开花期(2008-04-27)、乳熟期(2008-05-18), 成熟时由于茎秆干枯没有进行采样。在各生育期, 需要采集的水样有 6 种(地下水、植株水、降雨及 20、40、80、180 cm 深的土壤水)。其中, 地下水从 PVC 管中采集; 植株水样采用甲苯共沸蒸馏法从冬小麦茎秆中提取<sup>[19-21]</sup>, 并加入石蜡加热至熔点除去蒸馏水样品中残留的痕量甲苯; 各层土壤水样采用土壤水分提取器在 -0.85 kPa 条件下抽取(前一天抽出提取器中的空气和残留水分, 平衡 12~24 h 后第二天进行水样采集), 并认为每层提取的土壤水分能够代表该层次一段剖面。各水样采集后迅速转移至密封

瓶中并于 -20 °C 保存。

## 1.3 同位素测定及表示方法

各水样氢氧同位素测定仪器为同位素质谱仪 MAT253(美国 Thermo Finnigan 公司生产)。测定结果采用同位素组成( $\delta$ )表示,

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{water}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中,  $R$  为重同位素原子和轻同位素原子丰度之比, 下标 water 和 standard 分别表示水样和国际通用标准物 V-SMOW (Vienna standard mean ocean water, 其  $\delta$  值为 0)。

## 1.4 模型介绍

1.4.1 线性混合模型 线性混合模型已被广泛用于植物水源研究<sup>[5,7,9]</sup>, 其基本控制方程为:

$$\delta D_p = \sum f_i \delta D_i \quad (2)$$

$$\sum f_i = 1 \quad (3)$$

式中,  $\delta D_p$  为植物水的氢同位素组成,  $\delta D_i$  为水源  $i$  的氢同位素组成,  $f_i$  为水源  $i$  对植物的水分贡献。

如果植物只利用 2 种水源, 则方程(2)和(3)能求解, 如果存在 3 种水源, 则需将氧同位素组成代入方程(2), 形成 3 个方程对 3 种水源进行求解。如果水源多于 3 个(如本研究中土壤存在多层结构), 则该模型无法求解。Snyder 和 Williams<sup>[9]</sup>曾将各层土壤水以含水量为权重进行平均, 以便将土壤水作为 1 种水源, 这种方法在均一土壤结构、并且是树木水源的条件下可行, 而本研究地区土壤具有层次结构, 且冬小麦在各生育期根系长度的变化会导致不同层次土壤对其贡献不同, 因此具体区分各层土壤水分贡献是必要的, 但此时仅应用线性混合模型难于求解(变量的数量大于方程的数量)。

**1.4.2  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线法** 将土壤水、地下水等各种水源和植物水分的多个样本的数据绘制在  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线上,这些数据大致落在一条直线上,这些数据的回归方程为:

$$\delta D = M\delta^{18}O + N \quad (4)$$

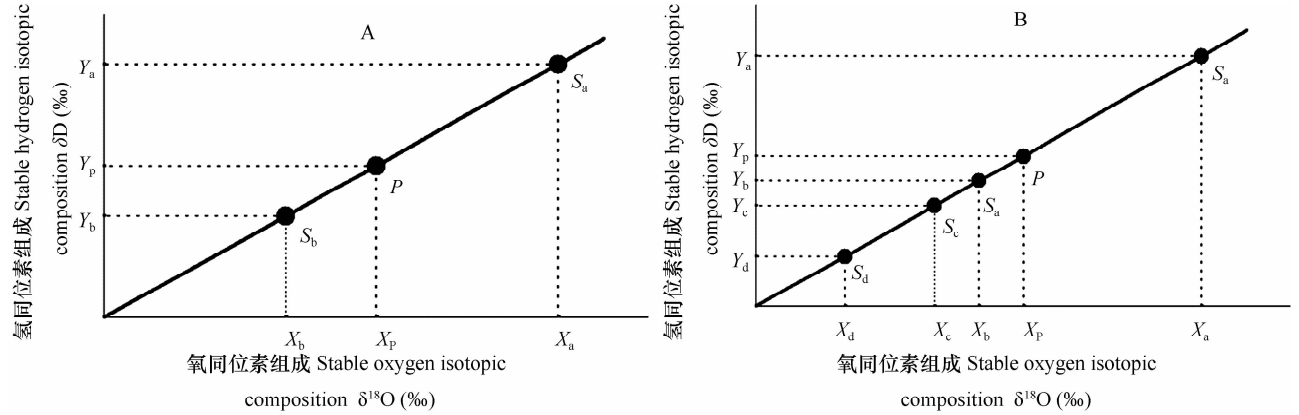
式中,  $\delta D$  为稳定性氢同位素组成,  $\delta^{18}O$  为稳定性氧同位素组成,  $M$  为系数,  $N$  为截距。

如果植物利用某种水源越多,那么其同位素组

成就越接近该水源,在  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线上就表现为其距离(植物水分和该水源同位素)越近,即某种水源的贡献率与其在  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线上和植物之间的距离成反比。图 1(A)中  $P$  表示植物,  $S$  表示水源,当只有两种水源时,水源  $S_a$  与  $S_b$  的贡献可以表示为:

$$R_a = PS_b / S_a S_b \quad R_b = PS_a / S_a S_b \quad (5)$$

式中,  $R$  为贡献率,  $PS_a$  为植物  $P$  与  $S_b$  之间的距离,其余类同。



注:  $P$ : 植物茎秆水分,  $S$ : 水源,  $X$ :  $\delta^{18}O$ 值,  $Y$ :  $\delta D$ 值,  $a, b, c, d$ 表示不同水源 Note:  $P$  stands for plant stem water,  $S$  for the water source,  $X$  and  $Y$  for the values of  $\delta^{18}O$  and  $\delta D$ , respectively, and  $a, b, c, d$  represents different water sources

图 1 两种水源及多种水源时的  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线图示

Fig. 1  $\delta D-\delta^{18}O$  plot with two (A) and multi (B) water sources

当存在多种水源时,从  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线上可直观定性分析各水源对植物的相对贡献。但采用  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线却难以定量分析各水源的贡献。这是因为该方法仅仅根据距离来计算相对贡献,而没有考虑水源与植物同位素之间距离的方向性(矢量性,即水源和植物的同位素组成的相对大小)。如图 1(B)中水源  $S_a, S_d$  和植物  $P$  的距离远且相等,而水源  $S_b, S_c$  和植物  $P$  距离近,如果只按照距离来计算,其结果必然是植物利用  $S_a$  等于  $S_d$ ,且低于  $S_b$  和  $S_c$ 。但实际上  $S_a$  作为唯一的“顶端”应该被植物利用较多(肯定要大于和其距离相同的  $S_d$ ),才能和 3 个“末端” $S_b, S_c, S_d$  一起作用,使相应的植物水分的同位素组成  $P$  出现在图 1(B)中。

**1.4.3 耦合模型** 本文建立了一个新的模型,即将线性混合模型和  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线耦合起来计算各种水源对冬小麦的贡献。首先,将所有水源分为两组。一组为顶端,其同位素组成高于冬小麦水分,一组为末端,其同位素组成低于冬小麦水分,则线性混合模型可以表示为:

$$P_{top}\delta^{18}O_{top} + P_{end}\delta^{18}O_{end} = \delta^{18}O_w \quad (6)$$

$$P_{top} + P_{end} = 1 \quad (7)$$

式中,  $P_{top}$  和  $P_{end}$  分别为顶端和末端在冬小麦总耗水中所占的比例,  $\delta^{18}O_{top}$  和  $\delta^{18}O_{end}$  分别为顶端和末端的平均  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{18}O_w$  为冬小麦茎秆水分的  $\delta^{18}O$ 。

其次,根据  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线计算各水源在其组内对冬小麦的相对贡献。先将冬小麦水分和各种可能水源的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  数据进行回归,得到  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线(方程 4)。

在 2 种水源条件下, Thorburn 和 Walker<sup>[8]</sup> 假设水源贡献与距离(水源与植物)成反比,本文进一步假设,在多种水源条件下,各组中各水源对冬小麦的贡献与其在该组内和冬小麦之间的距离成反比。因此可根据  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线计算出各水源在其组内所占的比例,如在顶端组中,

$$R_i = K/L_{i-w} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N R_i = 1 \quad (9)$$

$$L_{i-w} = \sqrt{(X_i - X_w)^2 + (Y_i - Y_w)^2} \quad (10)$$

式中,  $R$  为某水源在顶端组内的相对比例, 下标  $i$  和  $W$  分别表示水源  $i$  和冬小麦;  $K$  为无量纲系数;  $L_{i-w}$  为  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线上水源  $i$  和冬小麦之间的距离;  $N$  为顶端组内水源种类的数目;  $X$  为  $\delta D-\delta^{18}O$  曲线上  $\delta^{18}O$  值,  $Y$  为相应的  $\delta^{18}O$  值代入方程(4)计算得到的  $\delta D$  值。在计算中, 冬小麦水分、各层土壤水分以及地下水的  $\delta^{18}O$  均为同步采样测定。

因此,  $\delta^{18}O_{top}$  的计算公式为,

$$\delta^{18}O_{top} = \sum R_i \delta^{18}O_i \quad (11)$$

四个未知量 ( $R_i$ 、 $K$ 、 $L_{i-w}$ 、 $\delta^{18}O_{top}$ ) 可以通过 4 个方程(8)、(9)、(10)、(11) 进行求解。采用同样的方法, 可以计算出  $\delta^{18}O_{end}$ 。

最后, 根据线性混合模型(方程(6)和(7)) 计算顶端和末端对冬小麦的贡献率 ( $P_{top}$  和  $P_{end}$ ), 而各水源对冬小麦的贡献为:

$$P_i = P_{top} \text{ (or } P_{end}) \times R_i \quad (12)$$

式中各符号意义同前。

## 2 结 果

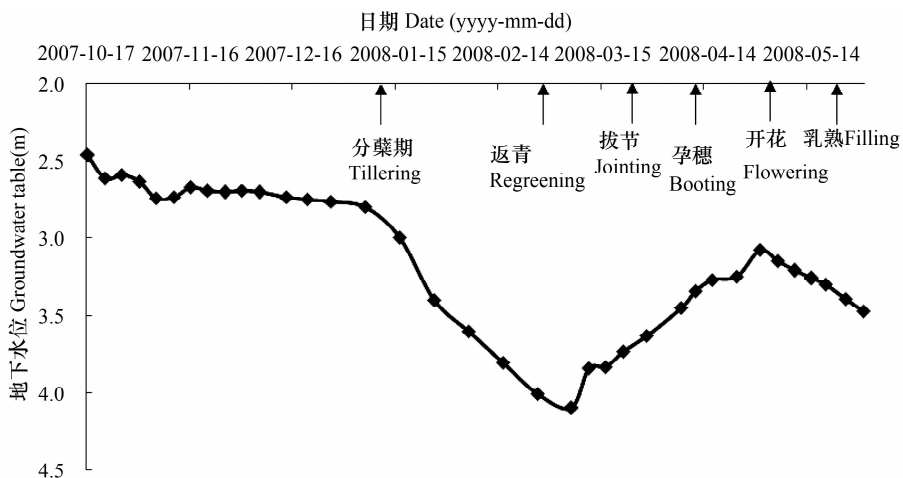
### 2.1 降雨、地下水位及土壤含水率

冬小麦全生育期处于旱季, 降雨量在研究时间内少且各生育期分布不均匀。由于降雨时间和各生育期采样时间不一致, 因此降雨事件如果发生在

某生育期采样以后, 则将该降雨事件归为下一个生育期。各生育期内降雨量超过 5.0 mm 的有苗期(2007-10-28, 11.9 mm; 2007-11-09, 5.9 mm)、孕穗期(2008-04-09, 54 mm)、开花期(2008-04-20, 41.6 mm)和乳熟期(2008-05-04, 28.5 mm; 2008-05-09, 6.3 mm; 2008-05-17, 10.1 mm), 其中, 分蘖期、返青期和拔节期没有降雨。

冬小麦全生育期的地下水位见图 2。从播种后到 2008-01-06 (分蘖期), 地下水位基本维持在 2.6~2.8 m, 然后急剧下降, 于 2008-03-06 降至最低(4.1 m)。从返青期到开花期, 地下水位缓慢地从 4.0 m 上升至 3.1 m (其中拔节期升至 3.5 m, 孕穗期升至 3.3 m, 开花期升至 3.1 m), 而后又呈下降趋势, 并于乳熟期降至 3.3 m。冬小麦收获时地下水位大概在 3.5 m 左右。

冬小麦各生育期的土壤体积含水率见图 3。从土壤剖面看, 在分蘖期和返青期, 土壤体积含水率从表层的  $0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  逐渐上升至 80 cm 处的  $0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , 然后急剧上升, 到 180 cm 处达到饱和和体积含水率。从拔节期到乳熟期, 0~80 cm 深度土壤体积含水率的变化趋势与前 2 个生育期一致, 即随着深度的增加而逐渐上升, 但 80 cm 后趋于下降, 在 110 cm 处达到最低, 随后又呈上升趋势, 并于 180 cm 处达到饱和。



注: 箭头表示各生育期采样时所对应的时间 Note: The arrows indicate sampling times corresponding to growth stages

图 2 冬小麦各生育期的地下水位

Fig. 2 Variation of groundwater table during the winter wheat growing period

### 2.2 不同生育期各水样的 $\delta D-\delta^{18}O$ 曲线

根据地下水位数据(图 2)以及冬小麦生长特点, 本研究确定冬小麦从分蘖期到拔节期的水源为

20、40、80 cm 处土壤水(因为这 3 个生育期根系很难达到 180 cm 以下, 难以利用 180 cm 处土壤水和地下水), 而从孕穗期到乳熟期其水源为地下水和

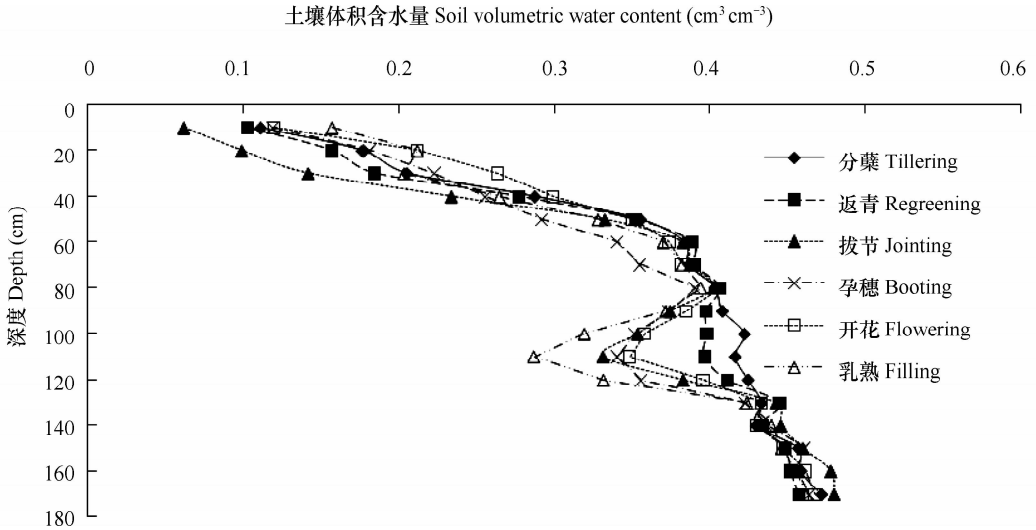
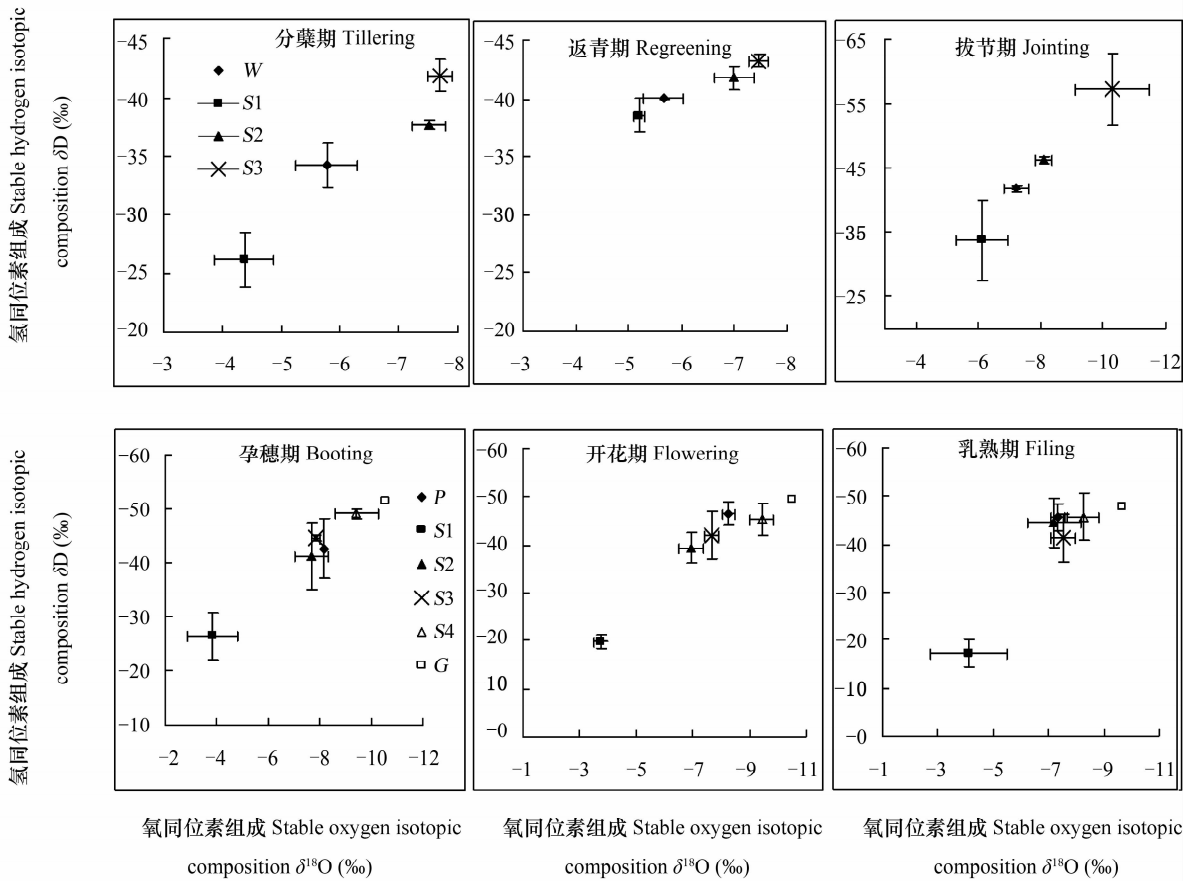


图 3 冬小麦各生育期的土壤体积含水量

Fig. 3 Average soil volumetric water content at different depths of a soil profile at each growth stage of winter wheat



注: P, G, S1, S2, S3, S4 分别指小麦茎秆水分、地下水、20、40、80、180 cm 土壤水; 分蘖期、返青期、拔节期有 2 种水源, 孕穗期、开花期、乳熟期有 6 种水源。图中数据均为平均值±标准误 Note: P, G, S1, S2, S3 and S4 stands for wheat stem water, ground-water, and soil water at 20, 40, 80 and 180 cm in depth, respectively. Two water sources for the growth stages of tillering, regreening, and jointing, and six sources for the growth stages of booting, flowering, and filling. All the data in the figure are presented as mean ± standard deviation

图 4 各生育期冬小麦茎秆水分和各种水源的 δD 和 δ¹⁸O

Fig. 4 δD and δ¹⁸O of stem water and waters of various sources at different growth stages of winter wheat

不同深度土壤水,则各生育期冬小麦水分和各种水源的  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  关系如图 4 所示。冬小麦水分  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  位于各种水源之间;土壤水在表层 20 cm 处由于蒸发而呈富集效应,且随着深度的增加而降低;地下水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  在各生育期均最小。

在冬小麦各生育期,将冬小麦和各种水源的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  原始数据(未进行平均计算)进行线性回归,得到的  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  曲线如表 2 所示,可见  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  呈显著正相关。

表 2 各种水分在冬小麦各生育期的  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  曲线

Table 2  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  plot of groundwater, soil water and plant water at different growth stages of winter wheat

| 生育期 Growth stage | $\delta D$ - $\delta^{18}O$ 曲线 $\delta D$ - $\delta^{18}O$ plot | 相关系数 Correlation coefficient <i>r</i> |
|------------------|---|---------------------------------------|
| 分蘖期 Tillering    | $\delta D = 4.775\delta^{18}O - 5.628$                          | 0.944 **                              |
| 返青期 Regreening   | $\delta D = 2.648\delta^{18}O - 24.35$                          | 0.909 **                              |
| 拔节期 Jointing     | $\delta D = 5.475\delta^{18}O - 1.685$                          | 0.982 **                              |
| 孕穗期 Booting      | $\delta D = 4.249\delta^{18}O - 8.746$                          | 0.962 **                              |
| 开花期 Flowering    | $\delta D = 4.664\delta^{18}O - 4.386$                          | 0.963 **                              |
| 乳熟期 Filling      | $\delta D = 6.571\delta^{18}O + 7.546$                          | 0.969 **                              |

注:数据均为平均值  $\pm$  标准误; \*\* 表示  $p=0.01$  水平上线性回归的显著性 Note: All the data are presented as mean  $\pm$  standard deviation, \*\* means the linear regression is significant at  $p=0.01$

### 2.3 各生育期不同水源对冬小麦的贡献

根据各种水分  $\delta^{18}O$  的大小(图 4),冬小麦各生育期水源的顶端组和末端组如表 3 所示。用于计算各水源在其组内相对比例的参数的获取方法为: $X$  为各种水分的  $\delta^{18}O$  平均值; $Y$  为采用方程(4)计算得到的  $\delta D$  值(表 2); $L$ 、 $K$  和  $R$  通过方程式(8)、式(9)和式(10)计算得到。所有这些参数如表 4 和表 5 所示。

将各水源  $\delta^{18}O$  平均值和其  $R$  值(表 5)代入方程(11),可以得到各生育期的  $\delta^{18}O_{top}$  和  $\delta^{18}O_{end}$ ,然后通过线性混合模型(方程(5)和方程(6))计算得到  $P_{top}$  和  $P_{end}$ (表 6)。通过方程(12)计算得到各水源对冬小麦各生育期的贡献(表 7)。从表 7 可看出,各种水源对冬小麦的贡献随着生育期的变化而变

化。在分蘖期、返青期和拔节期,20 cm 处土壤水为冬小麦的主要水源,由于该 3 个生育期冬小麦根系主要分布在表层,导致层土壤水利用最多,而随后的孕穗期、开花期、乳熟期则利用很少(均小于 5%);40 cm 处土壤水是冬小麦的重要水源,除了返青期(13.4%)和开花期(14.9%),在其余生育期的贡献均超过了 22.8%,乳熟期甚至高达 47.5%;80 cm 处土壤水在拔节期以前利用较少,但从孕穗到抽雄期,其所占全部水源的比例均在 33.0% 以上;180 cm 处土壤水在孕穗期和开花期利用较多(分别为 17.2% 和 31.3%),但在乳熟期利用不多(7.7%);地下水在开花期达到 16.4%,在孕穗和乳熟期利用较少。

表 3 冬小麦各生育期茎秆水分  $\delta^{18}O$  及水源分组

Table 3  $\delta^{18}O$  of stem water at different growth stages of winter wheat and grouping of water sources

|                  |        | 生育期 Growth stages |                |              |             |               |             |
|------------------|--------|-------------------|----------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
|                  |        | 分蘖期 Tillering     | 返青期 Regreening | 拔节期 Jointing | 孕穗期 Booting | 开花期 Flowering | 乳熟期 Filling |
| $\delta^{18}O_w$ |        | -5.8              | -5.7           | -7.2         | -8.2        | -8.3          | -7.4        |
| 分组<br>Group      | 顶端 Top | S1(-4.4)          | S1(-5.2)       | S1(-6.1)     | S1(-3.8)    | S1(-3.8)      | S1(4.1)     |
|                  |        |                   |                |              | S2(-7.7)    | S2(-7.0)      | S2(-7.2)    |
|                  |        |                   |                |              | S3(-7.8)    | S3(-7.7)      | S3(-7.5)    |
|                  | 末端 End | S2(-7.5)          | S2(-7.0)       | S2(-8.1)     | S4(-9.4)    | S4(-9.4)      | S4(-8.3)    |
|                  |        | S3(-7.7)          | S3(-7.5)       | S3(-10.3)    | G(-10.6)    | G(-10.5)      | G(-9.7)     |

注: $\delta^{18}O_w$  表示小麦茎秆  $\delta^{18}O$ , S1、S2、S3、S4 和 G 分别表示 20、40、80、180 cm 土壤水和地下水。括号内为该水源的  $\delta^{18}O$  值,单位为‰ Note:  $\delta^{18}O_w$  stands for  $\delta^{18}O$  of winter wheat stem, S1, S2, S3, S4 and G for soil water at 20, 40, 80, 180 cm in depth and groundwater, respectively. The values in parentheses are  $\delta^{18}O$  of that source, in the unit of ‰

表 4 用于计算不同水源对冬小麦各生育期贡献的参数

Table 4 Parameters used in estimating relative contribution of each water source to winter wheat at various growth stages

| 参数<br>Parameters | 生育期 Growth stage |                 |                |                |                |                |
|------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | 分蘖期 Tillering    | 返青期 Regreening  | 拔节期 Jointing   | 孕穗期 Booting    | 开花期 Flowering  | 乳熟期 Filling    |
| $X_w$            | -5.773 ± 0.530   | -5.668 ± 0.375  | -7.209 ± 0.400 | -8.173 ± 0.012 | -8.270 ± 0.239 | -7.353 ± 0.252 |
| $X_{S1}$         | -4.378 ± 0.501   | -5.201 ± 0.108  | -6.128 ± 0.842 | -3.838 ± 0.948 | -3.771 ± 0.245 | -4.112 ± 1.391 |
| $X_{S2}$         | -7.506 ± 0.283   | -7.000 ± 0.370  | -8.091 ± 0.270 | -7.668 ± 0.655 | -6.953 ± 0.447 | -7.202 ± 0.978 |
| $X_{S3}$         | -7.696 ± 0.206   | -7.463 ± 0.177  | -10.29 ± 1.189 | -7.836 ± 0.157 | -7.674 ± 0.256 | -7.530 ± 0.433 |
| $X_{S4}$         | —                | —               | —              | -9.417 ± 0.828 | -9.443 ± 0.412 | -8.265 ± 0.568 |
| $X_G$            | —                | —               | —              | -10.56         | -10.50         | -9.651         |
| $Y_w$            | -33.19 ± 1.892   | -39.362 ± 0.994 | -41.15 ± 2.191 | -43.49 ± 0.051 | -42.96 ± 1.115 | -40.77 ± 1.659 |
| $Y_{S1}$         | -26.539 ± 1.836  | -38.128 ± 0.286 | -35.23 ± 4.611 | -25.07 ± 4.026 | -21.98 ± 1.141 | -19.47 ± 9.140 |
| $Y_{S2}$         | -41.47 ± 2.139   | -42.890 ± 0.893 | -45.98 ± 1.479 | -41.34 ± 2.785 | -36.82 ± 2.084 | -39.78 ± 6.426 |
| $Y_{S3}$         | -42.37 ± 0.913   | -44.116 ± 0.468 | -58.01 ± 6.508 | -42.06 ± 0.667 | -40.18 ± 1.194 | -41.93 ± 2.848 |
| $Y_{S4}$         | —                | —               | —              | -48.78 ± 3.519 | -48.43 ± 1.923 | -46.76 ± 3.731 |
| $Y_G$            | —                | —               | —              | -53.62         | -53.37         | -55.87         |
| $L_{S1-w}$       | 6.805 ± 2.446    | 1.319 ± 0.306   | 6.019 ± 4.687  | 18.92 ± 4.136  | 21.46 ± 1.167  | 21.54 ± 9.245  |
| $L_{S2-w}$       | 8.456 ± 1.380    | 3.772 ± 0.955   | 4.909 ± 1.503  | 2.205 ± 2.861  | 6.283 ± 2.132  | 1.004 ± 1.419  |
| $L_{S3-w}$       | 9.383 ± 1.007    | 5.082 ± 0.500   | 17.139 ± 6.615 | 1.469 ± 0.685  | 2.843 ± 1.221  | 1.177 ± 1.664  |
| $L_{S4-w}$       | —                | —               | —              | 5.431 ± 3.615  | 5.593 ± 1.967  | 6.062 ± 3.774  |
| $L_{G-w}$        | —                | —               | —              | 10.40          | 10.65          | 15.28          |
| $K(\text{top})$  | 6.805 ± 2.446    | 1.319 ± 0.306   | 6.019 ± 4.687  | 0.842 ± 0.429  | 1.794 ± 0.669  | 0.959 ± 0.631  |
| $K(\text{end})$  | 4.448 ± 0.156    | 2.165 ± 0.381   | 3.816 ± 1.237  | 3.568 ± 1.602  | 3.667 ± 0.852  | 0.926 ± 0.975  |

注:表示计算时不包括该水源。表中数据均为平均值 ± 标准误。 $X$  为各水样的  $\delta^{18}\text{O}$  平均值; $Y$  为根据方程(4) 计算得到的  $\delta\text{D}$  值; $L$  为小麦与某水源在  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  曲线上的距离; $K$  为相对贡献因子;下标 W、G、S1、S2、S3、S4、top、end 分别指小麦茎秆水分、地下水、20、40、80、180 cm 土壤水、顶端组和末端组 Note: Means that the water source wasn't included in calculation. All the data are presented as mean ± standard deviation.  $X$  stands for average value of  $\delta^{18}\text{O}$  for each source;  $Y$  for  $\delta\text{D}$  value calculated through Eq. (4);  $L$  for distance between a certain water source to wheat in  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  curve;  $K$  for relative contribution factor; and the subscript W, G, S1, S2, S3, S4, top and end for wheat stem water, groundwater, soil water at 20, 40, 80 and 180 cm at depth, top group and end group, respectively

表 5 冬小麦不同生育期各种水源在其组内的贡献

Table 5 Relative contribution of each water source to its group at various growth stages of winter wheat

| 分组<br>Group      | 参数<br>Parameters | 生育期 Growth stages |                |               |               |               |                |
|------------------|------------------|-------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
|                  |                  | 分蘖期 Tillering     | 返青期 Regreening | 拔节期 Jointing  | 孕穗期 Booting   | 开花期 Flowering | 乳熟期 Filling    |
| 顶端组<br>Top group | $R_{S1}$         | 1                 | 1              | 1             | 0.045 ± 0.018 | 0.083 ± 0.027 | 0.0435 ± 0.112 |
|                  | $R_{S2}$         | —                 | —              | —             | 0.382 ± 0.512 | 0.286 ± 0.011 | 0.955 ± 0.112  |
|                  | $R_{S3}$         | —                 | —              | —             | 0.543 ± 0.494 | 0.631 ± 0.038 | —              |
|                  | $R_{S4}$         | —                 | —              | —             | —             | —             | —              |
|                  | $R_G$            | —                 | —              | —             | —             | —             | —              |
| 末端组<br>End group | $R_{S1}$         | —                 | —              | —             | —             | —             | —              |
|                  | $R_{S2}$         | 0.526 ± 0.067     | 0.574 ± 0.029  | 0.777 ± 0.015 | —             | —             | —              |
|                  | $R_{S3}$         | 0.474 ± 0.067     | 0.426 ± 0.029  | 0.223 ± 0.015 | —             | —             | 0.787 ± 0.092  |
|                  | $R_{S4}$         | —                 | —              | —             | 0.657 ± 0.154 | 0.656 ± 0.080 | 0.153 ± 0.028  |
|                  | $R_G$            | —                 | —              | —             | 0.343 ± 0.154 | 0.344 ± 0.080 | 0.061 ± 0.064  |

注:表示计算时不包括该水源或该水源不属于该组。表中数据均为平均值 ± 标准误。 $R$  为各水源对其所在组的相对贡献;下标 S1、S2、S3、S4、G 分别指 20、40、80、180 cm 土壤水和地下水 Note: Means that the water source was not included in calculation or in that group. All the data are presented as mean ± standard deviation.  $R$  stands for relative contribution of the source to its group; and the subscript S1, S2, S3, S4 and G for soil water at 20, 40, 80 and 180 cm in depth, and groundwater, respectively

表 6 用于线性混合模型计算的参数

Table 6 Parameters used in the two-tip linear mixing model

| 参数<br>Parameters                   | 生育期 Growth stages  |                    |                    |                    |                    |                    |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                    | 分蘖期 Filling        | 返青期 Regreening     | 拔节期 Jointing       | 孕穗期 Booting        | 开花期 Flowering      | 乳熟期 Filling        |
| $\delta^{18}\text{O}_{\text{top}}$ | $-4.378 \pm 0.501$ | $-5.202 \pm 0.108$ | $-6.128 \pm 0.842$ | $-7.594 \pm 0.295$ | $-7.142 \pm 0.421$ | $-7.064 \pm 0.868$ |
| $\delta^{18}\text{O}_{\text{end}}$ | $-7.596 \pm 0.064$ | $-7.197 \pm 0.269$ | $-8.580 \pm 0.445$ | $-9.807 \pm 0.734$ | $-9.807 \pm 0.357$ | $-7.770 \pm 0.580$ |
| $P_{\text{top}}$                   | $0.567 \pm 0.009$  | $0.767 \pm 0.028$  | $0.559 \pm 0.081$  | $0.739 \pm 0.074$  | $0.577 \pm 0.149$  | $0.591 \pm 0.404$  |
| $P_{\text{end}}$                   | $0.433 \pm 0.009$  | $0.233 \pm 0.028$  | $0.441 \pm 0.081$  | $0.261 \pm 0.074$  | $0.423 \pm 0.149$  | $0.409 \pm 0.404$  |

注:表中数据均为平均值  $\pm$  标准误。 $P$  为对小麦的贡献;下标 top 和 end 分别表示顶端组和末端组 Note: All data were presented as mean  $\pm$  standard deviation.  $P$  stands for contribution to wheat; and the subscripts "top" and "end" for the top group and the end group, respectively

表 7 不同水源对冬小麦各生育期的贡献

Table 7 Relative contribution of each water source to winter wheat at various growth stage (%)

|          | 生育期 Growth stages |                |                |                |                 |                |
|----------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
|          | 分蘖期 Tillering     | 返青期 Regreening | 拔节期 Jointing   | 孕穗期 Booting    | 开花期 Flowering   | 乳熟期 Filling    |
| $P_{S1}$ | $56.7 \pm 0.8$    | $76.7 \pm 2.8$ | $55.9 \pm 8.1$ | $3.3 \pm 1.2$  | $4.4 \pm 0.1$   | $2.2 \pm 2.8$  |
| $P_{S2}$ | $22.8 \pm 0.3$    | $13.4 \pm 2.1$ | $34.3 \pm 5.6$ | $28.2 \pm 6.3$ | $14.9 \pm 3.6$  | $47.5 \pm 6.8$ |
| $P_{S3}$ | $20.5 \pm 0.3$    | $9.9 \pm 0.6$  | $9.8 \pm 2.4$  | $42.3 \pm 4.8$ | $33.0 \pm 7.4$  | $39.5 \pm 8.2$ |
| $P_{S4}$ | —                 | —              | —              | $17.2 \pm 2.9$ | $31.3 \pm 13.5$ | $7.7 \pm 0.5$  |
| $P_G$    | —                 | —              | —              | $9.0 \pm 3.6$  | $16.4 \pm 1.2$  | $3.1 \pm 3.6$  |

注:表示计算时不包括该水源。表中数据均为平均值  $\pm$  标准误。 $P$  为对小麦的贡献;下标 S1、S2、S3、S4 和 G 分别指 20、40、80、180 cm 土壤水和地下水 Note: Means that the water source wasn't included in the calculation. All the data are presented as mean  $\pm$  standard deviation.  $P$  stands contribution to wheat; and the subscript S1, S2, S3, S4 and G for soil water at 20, 40, 80 and 180 cm at depth, and groundwater, respectively

## 3 讨论

### 3.1 耦合模型的合理性及优势

本研究所建立的耦合模型能够定量区分冬小麦水源,然而田间试验验证该模型是很困难的。目前,国际上普遍承认植物水分和各种水源的稳定同位素组成符合线性混合模型,并进行了广泛的应用<sup>[1,5,7,9,22]</sup>。在多种水源下,线性混合模型如方程(2)和(3)所示。

将方程(12)代入方程(6)中,可得到,

$$P_{\text{top}} \sum_{i=1}^{N_1} R_i \delta^{18}\text{O}_i + P_{\text{end}} \sum_{j=1}^{N_2} R_j \delta^{18}\text{O}_j = \delta^{18}\text{O}_w \quad (13)$$

式中, $i$  表示顶端中的水源, $N_1$  表示顶端水源的数目, $j$  表示末端中的水源, $N_2$  表示末端水源的数目,其余符号同上。将方程(12)代入方程(13)中,可得到,

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_i \delta^{18}\text{O}_i + \sum_{j=1}^{N_2} P_j \delta^{18}\text{O}_j = \delta^{18}\text{O}_w \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_i + \sum_{j=1}^{N_2} P_j = 1 \quad (15)$$

式中,符号意义同上。

方程(14)和(15)符合多种水源条件下的线性混合模型,即表明本研究采用的耦合模型计算结果是符合线性混合模型的。此外, $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  曲线的引进也是符合逻辑的,即植物利用某种水源越多,那么其同位素组成就越接近该水源。因此本研究采用的耦合模型在理论上是正确的,而且和单独的混合模型或  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  曲线相比,具有 2 个显然的优势:2 种水源时,单独采用  $\delta^{18}\text{O}$  或者  $\delta\text{D}$  进行混合模型计算时其结果是有差异的,而耦合模型综合了  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  的信息,其计算结果更准确;计算过程不受水源种类数量限制。

### 3.2 各生育期地下水位和土壤含水率对冬小麦各生育期水分利用的影响

从分蘖期到拔节期,地下水位在 2.7~4.0 m 之间变化(图 1,其中分蘖期为 2.7 m,返青期为 4.0 m,拔节期为 3.5 m),而冬小麦根系在这 3 个生育期很难达到该深度,因此本研究认为冬小麦在此生长阶段没有利用地下水。从孕穗期到乳熟期,冬小麦对地下水的利用和地下水位的变化一致,即从孕穗期



(地下水位为 3.3 m, 贡献为 9.0%) 开始上升, 至开花期地下水位(3.1 m) 和其贡献(16.4%) 均达到最大, 而乳熟期又呈下降趋势(地下水位为 3.3 m, 贡献为 3.1%)。

在分蘖、返青和拔节期, 各层土壤水分对冬小麦的贡献随着土壤深度的增加而降低(表 7), 而土壤体积含水率却是随着深度增加而升高(图 3), 其原因可能是冬小麦在这 3 个生育期, 其根系主要分布在表层土壤(0~20 cm), 导致土壤水分利用随着深度增加而降低; 20、40、80 cm 处土壤水的利用在孕穗期依次增加, 这与土壤体积含水率变化趋势一致, 而 180 cm 处土壤水分利用少于 40 和 80 cm 处; 开花期的各层土壤水分利用随着土壤体积含水率的增加而增加; 乳熟期各层土壤水分的利用和土壤含水率变化并不一致, 其中 40 和 80 cm 处土壤水分利用最多, 而 20 和 180 cm 处土壤水分利用较少。总体而言, 各层土壤水对冬小麦的贡献随生育期变化而变化, 和土壤体积含水率的变化趋势并不一致。这与 Rose 等<sup>[10]</sup>、Drake 和 Franks<sup>[11]</sup> 的研究结果有所出入, 他们认为植物对水分利用与土壤水分含量有关, 这可能是由于其研究对象是树木, 其根系能够深入整个土壤剖面, 而本研究中冬小麦的根系是随着生育期的不同而变化的。因此, 可以结合各生育期冬小麦根系在土壤中的分布变化来进一步深入研究冬小麦水分利用的机理。

## 4 结 论

线性混合模型和  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  曲线的耦合模型综合了各种水分氢氧同位素信息, 且能用于定量计算多种水源对冬小麦的贡献。本研究的初步结论为: 各水源对冬小麦的贡献随着生育期的变化而变化, 在分蘖期、返青期和拔节期, 冬小麦的主要水源为表层(20 cm) 土壤水, 且各土壤层次对冬小麦水分的贡献随着土壤深度的增加而降低; 孕穗期, 40、80 和 180 cm 处土壤水为主要水源, 地下水也贡献了 9.0% 的水分; 开花期的重要水源是 80 和 180 cm 处土壤水, 均占冬小麦全部水源的 30% 以上, 40 cm 土壤水和地下水也分别贡献了 14.9% 和 16.4%; 乳熟期利用最多的水分来自于 40 cm 土壤(47.5%), 其次是 80 cm 土壤(39.5%), 其余各种水源利用很少。

## 参 考 文 献

[ 1 ] White J W C, Cook E R, Lawrence J R, et al. The D / H ratios

of sap in trees: Implications of water sources and tree ring D / H ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 237—246

- [ 2 ] Dawson T E, Ehleringer J R. Isotope enrichment of water in the “woody” tissues of plants: Implications for plant water source, water uptake, and other studies which use the stable isotope composition of cellulose. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 3 487—3 492
- [ 3 ] Welker J M. Isotope ( $\delta^{18}O$ ) characteristics of weekly precipitation collected across the USA: an initial analysis with application to water source studies. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1 449—1 464
- [ 4 ] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alterations and ore deposition. *Economic Geology*, 1974, 69: 843—883
- [ 5 ] Dawson T E. Water sources of plants as determined from xylem-water isotopic composition: perspectives on plant competition, distribution, and water relations//Ehleringer J, Hall A, Farquhar G. Stable isotopes and plant carbon-water relations. San Diego: Academic Press, Inc., 1993:465—496
- [ 6 ] Pataki D E, Billings S A, Naumburg E, et al. Water sources and nitrogen relations of grasses and shrubs in phreatophytic communities of the Great Basin desert. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72: 1 581—1 593
- [ 7 ] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants: Implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 1993, 95: 565—574
- [ 8 ] Thorburn P J, Walker G R. The source of water transpired by *Eucalyptus camaldulensis*: Soil, groundwater, or streams? // Ehleringer J, Hall A, Farquhar G. Stable isotopes and plant carbon-water relations. San Diego: Academic Press, Inc., 1993: 511—527
- [ 9 ] Snyder K A, Williams D G. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105: 227—240
- [ 10 ] Rose K L, Graham R C, Parker D R. Water source utilization by *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* on thin soils over bedrock. *Oecologia*, 2003, 134: 46—54
- [ 11 ] Drake P L, Franks P J. Water resource partitioning, stem xylem hydraulic properties, and plant water use strategies in a seasonally dry riparian tropical rainforest. *Oecologia*, 2003, 137: 321—329
- [ 12 ] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards plateau, Texas, based on stable isotopes in water. *Journal of Hydrology*, 2007, 342: 238—248
- [ 13 ] Asbjornsen H, Mora G, Helters M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U. S. Agriculture. *Ecosystems and Environment*, 2007, 121: 343—356
- [ 14 ] Li S G, Hugo R S, Tsujimura M, et al. Plant water sources in the cold semiarid ecosystem of the upper Kherlen river catchment in Mongolia: A stable isotope approach. *Journal of Hydrology*, 2007, 333: 109—117
- [ 15 ] Schroth G. A review of belowground interactions in agroforestry,

- focusing on mechanisms and management options. *Agroforest Syst*, 1999, 43, :5—34
- [16] Lehmann J. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant Soil*, 2003, 255: 319—331
- [17] Flanagan L B, Ehleringer J R, Marshall J D. Different uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a Pinyon-Juniper woodland. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15: 831—836
- [18] Thorburn P J, Walker G R. Variations in stream water-uptake by *Eucalyptus-Camaldulensis* with differing access to stream water. *Oecologia*, 1994, 100: 293—301
- [19] Revesz K, Woods P H. A method to extract soil water for stable isotope analysis. *Journal of Hydrology*, 1990, 115: 397—406
- [20] Thorburn P J, Walker G R, Brunel J P. Extraction of water from *Eucalyptus* trees for analysis of deuterium and oxygen-18: Laboratory and field techniques. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16: 269—277
- [21] Cernusak L A, Pate J S, Farquhar G D. Diurnal variation in the stable isotope composition of water and dry matter in fruiting *Lupinus angustifolius* under field conditions. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25: 893—907
- [22] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. Characterisation of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: Implication for tracing water sources of trees. *Agriculture Water Manage*, 2000, 45: 229—241

## CONTRIBUTION OF SOIL WATER AT DIFFERENT DEPTHS IN PROFILE TO WINTER WHEAT IN FENGQIU IN HUANG-HUAI-HAI PLAIN OF CHINA

Zhang Congzhi<sup>1</sup> Zhang Jiabao<sup>1\*</sup> Zhang Hui<sup>2</sup>

(1 *State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

**Abstract** Crop water source is an important aspect in the study on water cycling in SPAC (Soil Plant Atmosphere Continuum) and water-saving agriculture. Traditional approaches are not adequate to determine contributions of different water sources to the crop. Based on the winter wheat field experiment in Fengqiu, using the stable hydrogen and oxygen isotope techniques, a new model coupling a linear mixing model with  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  curves was established and used to calculate contributions of different water sources to the winter wheat at various growth stages in the Huang-Huai-Hai Plain of China. Results show that contributions of the sources to winter wheat varied with the growth stage. Soil water in the top soil layer (0~20 cm) was the main water source to winter wheat at the tillering, regreening, and jointing stages; At the booting stage, the crop got its water mainly from the soil at 80cm in depth; At the flowering stage, it turned to the soil at 80 and 180 cm in depth for water supply; To wheat at the milk stage, soil water at 40 and 80 cm in depth contributed 47.5% and 39.5%, respectively, of the total the crop needed; And at the booting and flowering stages, the crop took 9.0% and 16.4%, respectively, of the water it used up from groundwater.

**Key words** Water source; Wheat; Stable hydrogen isotope; Stable oxygen isotope; Coupled model