

碳氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环研究中的应用

徐庆, 王婷, 高德强

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要:碳氢氧稳定同位素是存在于天然水体和植物组织中的良好的示踪剂,具有较高的灵敏度与准确性,可系统和定量地阐明草地生态系统水循环过程及各水体的转化关系、植物水分利用策略以及植被对全球变化的响应机制等。本文概述了稳定同位素的基本概念和原理,总结和分析了草地生态系统水循环的研究方法和现状,重点探讨和综述了氢氧稳定同位素技术在草地生态系统水循环过程(包括大气降水、地表水、土壤水、地下水、植物水、蒸发水等)以及碳稳定同位素技术在植物水分利用效率中应用的国内外研究进展,分析了其存在的问题,展望了这一领域未来的研究方向和应用前景,为我国草地资源保护、合理利用及退化草地生态系统恢复等提供理论依据。

关键词:草地生态系统;氢氧稳定同位素;碳稳定同位素;水循环过程;水分利用效率

中图分类号:S812.1

文献标识码:A

文章编号:1001-1498(2019)06-0130-07

草地是陆地生态系统的重要组成部分,具有重要的生产和生态功能^[1]。世界草地面积约占全球陆地面积的40%^[2],它不仅是畜牧业重要的生产基地,且在调节气候、保持水土、改良土壤和维持生物多样性等方面发挥着巨大作用^[1-3]。我国天然草地面积约在 $349 \times 10^4 \sim 392 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占国土总面积的40%以上^[1,4]。近半个世纪以来,受全球气候变化及人类活动影响,我国草地面临水资源短缺、植被退化、生态功能和生产力持续下降等严峻的生态问题^[3]。

水分是干旱半干旱地区植被生长和生态恢复的主要限制因子。目前,全世界80%的草地位于干旱半干旱地区,该地区具有降水稀少、蒸发量大、水资源储量低等特点^[5]。降水格局变化首先对土壤水分分布有影响^[2],进而影响草地植物个体和生态系统水分利用效率^[6],最终影响草地生态系统水循环过程及生产力水平^[7]。

前人对草地生态系统水文过程的研究,主要集中于运用传统水文学方法研究其水文过程的某一环节,如植被层对降水的截留和分配^[8-9]、植被蒸

散^[10]、土壤水分蒸发^[11]及土壤水分入渗^[12]等方面,且缺乏将草地生态系统各水体作为一个整体进行综合研究并定量化;而稳定同位素技术具有较高的灵敏度与准确性,可将生态系统水循环过程(包括从大气降水到地表水、土壤水、地下水、植物水和蒸发水等整个迁移、转化与分配过程)作为一个整体来研究,系统和定量地阐明其过程与机制^[13-14]。

本文综述了碳氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环研究中的国内外进展,并展望其未来的应用前景,对我国草地资源保护、科学利用以及退化草地生态系统恢复等具有重要的指导意义。

1 稳定同位素基本概念和原理

稳定同位素是指某元素中不发生或极不容易发生放射性衰变的同位素。天然存在于水分子中的氢有¹H(氕)和²H(氘)共2种稳定同位素,氧有¹⁶O、¹⁷O和¹⁸O共3种稳定同位素;天然碳有¹²C和¹³C共2种稳定同位素。不同环境条件下,各水体(包括植物水)氢氧稳定同位素和植物组织中碳稳定同位素组成不同,因此,可通过分析其微小变化,定量研究陆

收稿日期:2019-05-17 修回日期:2019-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31670720,31170661,31870716);林业公益性行业专项(201504423)。

* 通讯作者:徐庆,博士,研究员,主要从事稳定同位素生态学研究。E-mail:xuqing@caf.ac.cn

地生态系统水循环过程以及各水体转化关系。

由于稳定同位素在自然界含量极低,用绝对量表示其同位素的差异比较困难。因此,国际上规定使用相对量即待测样品的同位素比值(R_{sample})与一标准物质的同位素比值(R_{standard})作比较,比较结果称为样品的同位素值(δ 值),其定义为:

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

式中: R_{sample} 是样品中元素的重轻同位素丰度比(如D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$); R_{standard} 是国际通用标准物的重轻同位素丰度之比(氢、氧稳定同位素采用V-SMOW标准)。

2 氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环中的应用

2.1 大气降水

大气降水是生态系统水循环过程的重要输入项,是地表水、土壤水、地下水等的重要补给来源^[13, 15]。降水中氢氧稳定同位素组成受多种因素的影响,与降雨形成的气象条件、水蒸气的初始状态以及水汽的输送过程等密切相关^[16]。早在20世纪60年代,Craig^[17]利用全球大气降水氢氧同位素观测网络(GNIP)基础数据,将全球雨水线(GMWL)定义为 $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 。然而,由于自然界的蒸发过程常伴有动力学分馏,加上各地蒸发过程的差异,不同地区测得的大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上均有不同程度的偏移^[18-19]。在我国,郑淑蕙等^[20]率先提出我国大气降水线为 $\delta D = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$,为我国大气降水稳定同位素特征研究奠定了基础。随后,越来越多国内学者提出地区大气降水线(LMWL)^[16, 18-19],推动了我国区域大气降水氢氧同位素特征和水汽来源的深入研究。

降水通过在土壤中的入渗过程补给土壤水和地下水^[21],大气降水氢氧同位素组成和特征可反映出区域降水形成的气象条件、水汽的来源及水汽在运移过程中环境条件的变化。吴华武等^[22]建立了青海湖流域芨芨草(*Achnatherum splendens*)草地的大气降水线方程(LMWL): $\delta D = 8.07\delta^{18}\text{O} + 14.8$,其斜率和截距与全球降水线的斜率和截距较接近。肖雄等^[23]对青海湖流域的沙柳河高寒草甸大气降水氢氧同位素组成进行分析得出该地区降水线方程(LMWL)为: $\delta D = 8.72\delta^{18}\text{O} + 25.09$,斜率和截距均大于全球大气降水线,主要由于该研究区位于海拔3500 m以上,植被覆盖主要为高寒草甸,受局部

气候环境影响,如降水量、空气湿度较大,雨水凝结时存在一定的同位素动力分馏效应。李国琴^[24]对黄土高原羊圈沟流域灌草生态系统的研究得出:当地大气降水线方程(LMWL)为: $\delta D = 7.62\delta^{18}\text{O} + 5.03$,其降水线的斜率和截距均小于全球降水线的,说明该地区大气降水在降落过程中受到一定的蒸发分馏作用影响。Granger等^[25]通过测定英格兰西南部草地降水 $\delta D(\delta^{18}\text{O})$,发现该地区 $\delta D(\delta^{18}\text{O})$ 与全球大气降水 $\delta D(\delta^{18}\text{O})$ 相似,其均值为 -37‰ (-5.7‰)。

2.2 地表水

McNeely^[26]通过运用氢氧同位素研究美国华盛顿东部干旱草地夏季河水的水源,发现2011年夏季和2014年初,河水主要来自当地湖泊,而在2014年夏末时又转为依赖于地下水。Windhorst等^[27]运用CMF(Catchment Modeling Framework)水文模型和氢氧同位素对厄瓜多尔山地草地坡面尺度上产流过程的解析表明,尽管该地区有陡峭的斜坡,但地表径流量小,且补给地下水和浅层侧向地下流是该地区水资源输出项的重要部分,分别占50%和16%。

2.3 土壤水

土壤水是联系大气降水、地表水和地下水的纽带,在土壤-植被-大气系统的物质与能量转化中起着重要作用^[28]。土壤水氢氧同位素组成受大气降水、地表水、蒸发水以及水分在土壤中的水平迁移和垂直运动等多种因素的影响^[29-30],因此,通过分析土壤水中的氢氧同位素时空分布来定量研究土壤水分的运移过程不失为一种有效方法^[30]。王锐等^[31]利用氢氧同位素研究陕西长武塬区草地发现,表层土壤水 $\delta D(\delta^{18}\text{O})$ 受降水 $\delta D(\delta^{18}\text{O})$ 直接影响较明显,且降水在土壤剖面向下入渗过程中与浅层土壤自由水发生不同程度的混合。张小娟等^[32]对云南省元阳梯田水源区乔木林、灌木林、荒草地和无林地中0~100 cm土壤水氧同位素组成分析发现,乔木林和荒草地深层土壤水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于表层土壤,而灌木林和无林地则相反,表明不同的土地利用方式下,降水在土壤剖面中入渗过程和机制不同。

肖雄等^[23]通过对青海湖流域高寒草甸壤中流水分来源研究发现,壤中流在坡下土壤上层(0~40 cm)和下层(40~80 cm)的产流中氢氧稳定同位素值相对聚集,并具有较明显的蒸发富集现象,表明该壤中流多源于雨前土壤水。对于坡中壤中流水分来源因土壤深度而异,在坡中土壤下层(40~80 cm),

大气降水和雨前土壤水对壤中流的贡献相当;壤中流在坡中土壤上层(0~40 cm)产流与当地大气降水的季节变动基本一致,表明壤中流主要受到大气降水的驱动,且与坡中金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛根系和土壤孔隙分布有关。

2.4 地下水

稳定同位素技术在地下水的水分来源、水分运移过程、地下水与地表水相互作用及转换关系等方面有其独特优势^[13]。Wu等^[33]利用氢氧稳定同位素研究内蒙古半干旱地区锡林郭勒草原生态系统锡林河流域中降水、地表径流和地下水的补给关系,发现降水对下游径流贡献较大,地下水是锡林郭勒草原河流的主要水源,春季由融雪及河水对地下水进行补给。Li等^[34]运用¹⁸O、D及Cl⁷等多种稳定同位素示踪剂,结合CMB(化学质量平衡法)对黄土高原的草地、森林和农田的地下水补给机制及黑河流域降水、土壤水和地下水氢氧同位素组成和水化学特征的分析,发现流域尺度上每年约19%的降水补给到地下水,通过优先流入渗补给地下水的约占降水补给的87%,活塞流对地下水补给占降雨补给的13%。

2.5 蒸发水

蒸散(ET)是生态系统水分损失的重要组成部分。在蒸发大于蒸腾的干旱半干旱地区,利用氢氧稳定同位素进行蒸散拆分是目前较为有效的方法^[35-36]。Wen等^[36]在我国北方栾城小麦/玉米农田和多伦草地,对其露水、大气水汽、叶片水、植物(木质部)水和土壤水的D和¹⁸O以及整个生态系统的水通量进行了测定和分析,研究发现露水由冠层上方水汽向下的通量(98%)和冠层下部叶片及土壤蒸发蒸腾向上的通量(2%)组成。Rey^[35]通过测量丛生灌木、丛生禾草蒸发与蒸散的比值发现,丛生灌木利用0~10 cm的土壤水含量的18%进行蒸腾作用,但丛生禾草不利用近地表土壤水而利用深层土壤水进行蒸腾。Good等^[37]运用氢稳定同位素技术对肯尼亚中部草地蒸散进行拆分,发现在草本生长期蒸腾作用占总水汽通量的比例从0%增加到40%;生长期之后,蒸腾作用占总水汽通量的比例下降。

2.6 植物水分来源和水分利用策略

水分对干旱和半干旱地区草地植物的生长和分布至关重要,草地植物通过不同的水分利用策略来应对水分胁迫^[38]。研究表明,除部分盐生植物外,

水分在被根系吸收以及由根向叶运移的过程中不发生氢氧同位素分馏,因此,可通过比较植物茎(木质部)水与其各潜在水源的氢氧同位素组成可确定植物的水分来源^[13, 39]。Yang等^[40]通过分析内蒙古典型草地植物水与土壤水中的 δD ,发现糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)只利用夏季降雨;羊草(*Leymus chinensis*)和大针茅(*Stipa grandis*)既利用夏季降雨也利用深层土壤水;小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)只利用深层土壤水。Prechsl等^[41]通过分析干旱条件下中欧亚高山草原土壤水及植物水 δD ($\delta^{18}O$)值,发现对照与干旱处理下的亚高山草原植物的水分利用深度没有差异。Rossatto等^[42]利用 δD ($\delta^{18}O$)分析了巴西热带稀树草原植物的水分利用格局,发现除禾本科(Poaceae)及莎草科(Cyperaceae)植物外,其余草本植物在旱季主要利用10~40 cm土壤水,而在湿季则转为利用70~100 cm土壤水。郑肖然等^[43]利用氢氧同位素研究内蒙古草地小叶锦鸡儿水分来源,发现在遮雨处理条件下,小叶锦鸡儿主要利用0~20 cm处土壤水;在自然状态下,对0~20、20~60和60~100 cm三个不同深度土壤水分利用较为均衡,研究表明不同生境下灌木与草本植物的水分竞争可能是该草地生态系统小叶锦鸡儿对不同土层水分利用差异的主要原因。

3 碳同位素在草地生态系统水分利用效率研究中的应用

植物水分利用效率(WUE)作为表征干物质生产所耗费水量的重要指标,不仅反映了生态系统碳、水循环及其耦合关系^[44],同时也成为揭示陆地生态系统对全球变化响应和适应对策的重要手段^[6]。碳稳定同位素技术可定量揭示气候环境的变化对植物生理生态过程的影响,为研究植物养分循环和生理代谢相互作用提供可靠途径^[45]。近几十年来,利用碳稳定同位素($\delta^{13}C$)定量研究植物WUE成为科学家关注的焦点之一,并在草地生态系统开展了一系列相关研究,以期评估全球气候变化对草地生态系统的影响提供参考。目前,WUE按研究尺度可分为叶片尺度^[46]、个体尺度^[47]和生态系统尺度^[6]。

植物叶片的碳稳定同位素($\delta^{13}C$)整合了植物组织固碳过程中内部生理特征和外部影响光合气体交换的环境因子的影响^[48]。研究表明,植物叶 $\delta^{13}C$ 值与胞间CO₂浓度与大气CO₂浓度比值(C_i/C_a)呈负相关,是间接指示植物长期WUE的有效指标^[49]。

王亚婷等^[46]在内蒙古短花针茅(*Stipa breviflora*)草地通过测定植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值发现 C_3 植物WUE低于 C_4 植物,且随放牧活动(如载畜率)的增加,植物WUE均显著降低,倾向于节水型的保守生长策略。

在个体水平上,由于植物个体WUE与叶片长期WUE很接近,因此可通过叶片WUE来估算^[44]。刘莹等^[47]通过测定叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分析白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)在不同干旱胁迫下的WUE,发现白羊草WUE与叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著正相关,证实可通过测定 C_4 植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值来判断干旱条件下植物水分利用效率情况。Gong等^[50]通过测定植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 来探索灌溉对羊草、冰草(*Agropyron cristatum*)、大针茅及冷蒿(*Artemisia frigida*)水分利用效率及氮素利用效率的影响,发现灌溉处理增强了植物的氮利用效率而减小了植物的水分利用效率。

在生态系统水平上,WUE能够反映植物水分利用策略,用以描述生态系统碳水循环之间的耦合关系,开展生态系统WUE研究可以揭示植物对环境的适应机制^[51-52]。Abraha等^[51]在美国密歇根州的草地中利用碳稳定同位素技术和涡度相关技术测定生态系统水分利用效率(eWUE)和植物内在水分利用效率(iWUE),发现该草地eWUE的差异在很大程度上是由植物群落中 C_3 和 C_4 物种的相对优势度决定的,在潮湿的温带气候环境中,常见的短期和偶尔的长期干旱,随着时间的推移,混合草地将越来越多地以 C_4 植物为主,具有比 C_3 植物更高的产量和eWUE,进而对生态系统碳和水的平衡产生影响。如Flanagan和Farquhar^[46]利用以上两种方法计算加拿大北部草地植物叶片和生态系统WUE,结果表明叶片尺度计算出来的WUE比生态系统尺度的高2~3倍,原因可能是没有考虑植物根呼吸产生的碳损失和土壤蒸发产生的水分损失。Kohler等^[52]观测了1857年至2007年间,英国洛桑斯特德草地群落碳同位素组成,发现在过去的150年里,随着大气中 CO_2 浓度的增加,群落水平 $\delta^{13}\text{C}$ 值保持不变或略有增加,表明在养分限制的草地上,植物通过降低气孔导度以适应 CO_2 浓度的升高。

4 研究展望

碳氢氧稳定同位素技术以其简捷、快速、精确和高效等特点,可有效地指示草地生态系统大气降水、地表水、土壤水、地下水、蒸发水和植物水等各种水体的水分来源、运移过程以及其转化关系,同时也为

全面理解草地生态系统水循环过程和机制等研究提供了新方法和新思路^[53]。近年来,随着同位素质谱仪的不断改进,精确测量陆地生态系统各组分水体碳氢氧同位素的丰度成为可能,使陆地生态系统水循环的研究方法,从水的分子结构层次(物理方法)和原子结构层次(化学方法)深入到原子核结构层次(同位素方法),可解决生态系统水循环过程中许多利用传统技术无法解决的难题^[13]。另外,激光同位素测量技术和傅里叶变换红外(FTIR)光谱技术也可快速连续、准确的测定环境大气中水汽的氢氧稳定同位素组成。可见,稳定同位素测量技术在生态学及陆地生态系统水循环过程中也将发挥越来越重要的作用。根据目前的研究状况,今后草地生态系统水循环过程的碳氢氧稳定同位素示踪研究还应注重以下几个方面:

(1)由于大范围样品及数据采集较为困难,目前的研究多数是在小范围小尺度内开展的,这对于准确认识全球气候变化背景下草地生态系统水循环过程是十分有限的。因此,今后的研究可以针对不同时空尺度进行,由微观到宏观,从小尺度、中尺度到大尺度,将草地生态系统水循环过程与全球气候变化相结合,为全国乃至全球草地生态系统水循环的定量研究提供更广阔的空间。

(2)以往大多同位素示踪研究针对草地生态系统水循环过程中的某一环节,缺乏系统性和整体性。所以今后的研究应将草地生态系统整个水循环过程,包括大气降水、地表水、土壤水、地下水、蒸发水和植物水等作为一个整体来研究,将水循环各个过程,如土壤水入渗、地下水补给及植物吸水等相结合,系统和定量地揭示草地生态系统水循环过程和机制。

(3)前人已经对自然因素(降水变化、温度变化等)及人为因素(放牧活动等)对草地生态系统水循环过程的影响作了初步研究,但二者的交互作用对草地生态系统水循环过程影响仍不清楚。然而,在草地生态系统中,自然因素及人为因素往往同时存在,因此今后的研究中应注重二者对草地生态系统水循环过程的关键因子及各关键因子交互作用的影响。

(4)碳氢氧稳定同位素对环境信息极其敏感,其测定过程对实验人员技术水平要求较高,从野外采样、室内预处理实验到同位素测定和分析等过程中的每一环节要求都特别严格,如采样过程中,应注

意保证样品的密封性,防止水分蒸发分馏;固体样品的水分抽提过程中,为避免空气中水汽对测定样品的影响,需在真空条件下通过蒸发冷凝法提取水分等;同位素测定过程中,标准样选择、进样口的隔膜需定期更换等等。然而,目前各稳定同位素实验室的采样、仪器设备类型及测定标准不完全相同,造成不必要的仪器和方法上的误差,因此需尽早制定全国稳定同位素实验室各实验环节操作规范及标准体系。

参考文献:

- [1] 方精云,耿晓庆,赵霞,等. 我国草地面积有多大? [J]. 科学通报, 2018, 3(17): 1731-1739.
- [2] Ren G H, Wang C X, Dong K H, *et al.* Effects of grazing exclusion on soil-vegetation relationships in a semiarid grassland on the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(11): 4071-4079.
- [3] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, *et al.* Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [4] 张利,周广胜,汲玉河,等. 中国草地碳储量时空动态模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(10): 1392-1405.
- [5] 王永明,韩国栋,赵萌萌,等. 草地生态水文过程研究若干进展[J]. 中国草地学报, 2007, 29(3): 98-103.
- [6] Niu S L, Xing X R, Zhang Z, *et al.* Water-use efficiency in response to climate change: from leaf to ecosystem in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1073-1082.
- [7] Wilcox K R, Shi Z, Gherardi L A, *et al.* Asymmetric responses of primary productivity to precipitation extremes: a synthesis of grassland precipitation manipulation experiments[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4376-4385.
- [8] 余开亮,陈宁,余四胜,等. 物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5771-5779.
- [9] Qiao L, Zou C B, Stebler E, *et al.* Woody plant encroachment reduces annual runoff and shifts runoff mechanisms in the tallgrass prairie, USA[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 4838-4849.
- [10] Coners H, Babel W, Willinghöfer S, *et al.* Evapotranspiration and water balance of high-elevation grassland on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 557-566.
- [11] Kayler Z E, Brédoire F, Memillan H, *et al.* Soil evaporation and organic matter turnover in the Sub-Taiga and Forest-Steppe of south-west Siberia[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10904.
- [12] Archer N A L, Otten W, Schmidt S, *et al.* Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(4): 585-600.
- [13] 徐庆,安树青,刘世荣,等. 环境同位素在森林生态系统水循环研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2008, 21(3): 11-15.
- [14] Xu Q, Li H B, Chen J Q, *et al.* Water use patterns of three species in subalpine forest, southwest China: the deuterium isotope approach[J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 236-244.
- [15] 郝玥,余新晓,邓文平,等. 北京西山大气降水中D和¹⁸O组成变化及水汽来源[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1211-1221.
- [16] Li Y J, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Stable isotope in precipitation in China: a review[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2012, 4(1): 83-90.
- [17] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [18] 高德强,徐庆,张蓓蓓,等. 鼎湖山大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 384-391.
- [19] 张蓓蓓,徐庆,姜春武. 安庆地区大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 林业科学, 2017, 53(12): 20-29.
- [20] 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.
- [21] Fang Q Q, Wang G Q, Xue B L, *et al.* How and to what extent does precipitation on multi-temporal scales and soil moisture at different depths determine carbon flux responses in a water-limited grassland ecosystem? [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1255-1266.
- [22] 吴华武,李小雁,蒋志云,等. 基于 δD 和 $\delta^{18}O$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8174-8183.
- [23] 肖雄,李小雁,吴华武,等. 青海湖流域高寒草甸壤中流水分来源研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 230-236.
- [24] 李国琴. 黄土高原羊圈沟流域草灌生态系统土壤水运移过程[D]. 太原: 山西大学, 2017, 21-22.
- [25] Granger S J, Bol R, Meier-Augenstein W, *et al.* The hydrological response of heavy clay grassland soils to rainfall in south-west England using δ^2H [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2010, 24(5): 475-482.
- [26] Mcneely C, Nezat C A, Gebauer A D. Determining water sources for summer stream flow and riparian plants in an arid grassland using stable isotopes of hydrogen and oxygen [C]. *ESA Annual Meeting*, Baltimore, 2015, 3-45.
- [27] Windhorst D, Kraft P, Timbe E, *et al.* Stable water isotope tracing through hydrological models for disentangling runoff generation processes at the hillslope scale[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(10): 4113-4127.
- [28] Zhang B B, Xu Q, Gao D Q, *et al.* Higher soil capacity of intercepting heavy rainfall in mixed stands than in pure stands in riparian forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 1514-1522.
- [29] 徐庆,刘世荣,安树青,等. 四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 8-14.
- [30] Xu Q, Liu S R, Wan X C, *et al.* Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in south-

- western China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(25): 3800–3809.
- [31] 王锐, 刘文兆, 宋献方. 黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 134–137, 184.
- [32] 张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 等. 元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2102–2108.
- [33] Wu J, Barthold F K, Breuer L, *et al.* Understanding catchment hydrology in semiarid steppe ecosystems of china by isotopic composition; a case study of the Xilin catchment[C]. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, 2008.
- [34] Li Z, Chen X, Liu W Z, *et al.* Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586(2): 827–835.
- [35] Rey K J. Using stable isotope hydrology to partition evapotranspiration in the sagebrush steppe[C]. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, 2016.
- [36] Wen X F, Lee X, Sun X M, *et al.* Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a cropland and a grassland in China[J]. *Oecologia*, 2012, 168(2): 549–561.
- [37] Good S P, Soderberg K, Guan K, *et al.* $\delta^2\text{H}$ isotopic flux partitioning of evapotranspiration over a grass field following a water pulse and subsequent dry down[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50: 1410–1432.
- [38] Zhou H, Zhao W Z, Zhang G F. Varying water utilization of *Haloxylon ammodendron* plantations in a desert-oasis ecotone[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 31(4): 825–835.
- [39] Brunel J P, Walker G R, Kennetsmith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 167(1): 351–368.
- [40] Yang H, Auerswald K, Bai Y F, *et al.* Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 340(1–2): 303–313.
- [41] Prechsl U E, Burri S, Gilgen A K, *et al.* No shift to a deeper water uptake depth in response to summer drought of two lowland and sub-alpine C_3 -grasslands in Switzerland[J]. *Oecologia*, 2015, 177: 97–111.
- [42] Rossatto D R, Sternberg L D S L, Franco A C. The partitioning of water uptake between growth forms in a Neotropical savanna: do herbs exploit a third water source niche? [J]. *Plant Biology*, 2013, 15: 84–92.
- [43] 郑肖然, 赵国琴, 李小雁, 等. 氢同位素在内蒙古小叶锦鸡儿灌丛水分来源研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 184–196.
- [44] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3255–3265.
- [45] Flanagan L B, Farquhar G D. Variation in the carbon and oxygen isotope composition of plant biomass and its relationship to water-use efficiency at the leaf-and ecosystem-scales in a northern Great Plains grassland[J]. *Plant Cell & Environment*, 2014, 37(2): 425–438.
- [46] 王亚婷, 王玺, 朱国栋, 等. 内蒙古短花针茅草原植物水分及氮素利用效率对载畜率的响应[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(6): 59–64.
- [47] 刘莹, 李鹏, 沈冰, 等. 采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3055–3064.
- [48] Farquhar G D, O'leary M H O, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9: 121–137.
- [49] 任书杰, 于贵瑞. 中国区域 478 种 C_3 植物叶片碳稳定性同位素组成与水分利用效率[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 119–124.
- [50] Gong X Y, Chen Q, Lin S, *et al.* Tradeoffs between nitrogen-and water-use efficiency in dominant species of the semiarid steppe of Inner Mongolia[J]. *Plant and Soil*, 2011, 340(1–2): 227–238.
- [51] Abraha M, Gelfand I, Hamilton S K, *et al.* Ecosystem water-use efficiency of annual corn and perennial grasslands: contributions from land-use history and species composition[J]. *Ecosystems*, 2016, 19(6): 1001–1012.
- [52] Kohler I H, Poulton P R, Auerswald K, *et al.* Intrinsic water-use efficiency of temperate seminatural grassland has increased since 1857: an analysis of carbon isotope discrimination of herbage from the Park Grass Experiment[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1531–1541.
- [53] Chen J, Xu Q, Gao D Q, *et al.* Differential water use strategies among selected rare and endangered species in West Ordos Desert of China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2017, 10(4): 660–669.

Application of Carbon, Hydrogen and Oxygen Stable Isotope on Hydrologic Cycle of Grassland Ecosystem: A Review

XU Qing, WANG Ting, GAO De-qiang

(Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of the National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Grassland is a major component and important resource of terrestrial ecosystem and has important production and ecological functions. However, the grassland in China has faced with severe ecological problems such as water resource shortage and vegetation degradation due to global climate change and long-term irrational utilization, which poses a serious threat to the stability of ecosystem. Therefore, quantitatively studying the hydrologic cycle of grassland ecosystem provides important application value and significant guidance for the protection and sustainable development of grassland ecosystem. Stable isotopes of carbon, hydrogen and oxygen are natural tracers in water body and plant tissue, with high sensitivity and accuracy. Stable isotopes of hydrogen and oxygen can be used to systematically and quantitatively clarify the hydrologic cycle and processes of grassland ecosystem, the conversion relationship between water bodies, the water use strategy of plants and the response mechanism of vegetation to global climate change. In this article, the basic concept and principle of stable isotopes are reviewed. The research methods for examining the hydrologic cycle of grassland ecosystems and their application are summarized and analyzed. Progresses in the application of hydrogen and oxygen stable isotopes in the hydrologic process of grassland ecosystem are extensively discussed, including atmospheric precipitation, runoff, soil water, groundwater, water source for plants, and evaporation, and the application of carbon stable isotope in plant water use efficiency. The problems and future researches of stable isotope techniques in the study of hydrologic cycle are discussed and analyzed.

Keywords: grassland ecosystem; hydrogen and oxygen stable isotope; carbon stable isotope; hydrologic process; water use efficiency

(责任编辑:彭南轩)