

中国西北干旱区过度灌溉绿洲的水分收支特征研究

王蓓¹ 鄢春华¹ 王月¹ 李程¹ 张清涛² 邱国玉^{1,†}

1. 北京大学环境与能源学院, 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 中山大学土木工程学院, 广州 510275;

† 通信作者, E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

摘要 基于水分收支平衡原理, 观测2012年生长季张掖绿洲的水分收支分量动态特征, 探究灌溉对绿洲水分收支的影响。结果表明: 1) 无降水及灌溉时, 绿洲内40~100 cm深度的土壤含水量高于0~20 cm的土壤, 强降水事件对0~20 cm的土壤含水量影响较大, 而灌溉事件对0~100 cm的土壤含水量有明显影响; 2) 无降水及灌溉时, 绿洲的日均蒸散发(ET)为2.83 mm/d, 降水事件后3日蒸散发量为降水之前的1.16倍, 灌溉事件之后2日蒸散速率为灌溉之前的1.88倍, 说明灌溉对绿洲的蒸散发影响更为显著; 3) 绿洲生长季水分收支收入项(降水和灌溉, $P+I$)中, 灌溉占89.7%, 水分支出项主要为深层渗漏(DP), $DP/(P+I)$ 为81%; 4) 2012年生长季绿洲灌溉需水量为213 mm, 实际灌溉量比灌溉需水量多出474 mm, 远远超出所需, 水资源浪费严重。

关键词 灌溉; 土壤水分; 蒸散发; 水分收支

Water Budget Characteristics of Over-Irrigated Oasis in Arid Region of Northwest China

WANG Bei¹, YAN Chunhua¹, WANG Yue¹, LI Cheng¹, ZHANG Qingtao², QIU Guoyu^{1,†}

1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

2. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275;

† Corresponding author, E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

Abstract Based on the water balance equation, a field experiment was carried out to observe the dynamic characteristic of volumetric soil water content during growing season of 2012 and to explore the impact of irrigation on the oasis water budget. The results showed that in the Zhangye oasis, the volumetric soil water content at the depth of 40–60 cm was higher than that at the depth of 0–20 cm during days without precipitation and irrigation. Heavy precipitation has an obvious impact on the volumetric soil water content at the depth of 0–20 cm while irrigation has an obvious impact at the depth of 0–100 cm. The daily evapotranspiration (ET) was 2.83 mm/d during days without precipitation and irrigation. The ET volume of the third day after precipitation increased by 16% compared to the ET volume before precipitation. The ET rate of the second day after irrigation was observed with an increase of 88% compared to the ET rate before irrigation, indicating that the impact of irrigation on ET was more significant than that of precipitation. The primary incomings of the water budget in the oasis was irrigation, which accounted for 89.7% of the total incomings. The main outgoings of the water budget in the oasis was deep percolation (DP), which accounted for 81% of the total outgoings. The irrigation water requirement was only 213 mm during the growing season of 2012, but the real irrigation volume exceeded the irrigation water requirement by 474 mm. Excessive deep percolation and serious water wastage was obvious during growing season due to the heavy irrigation.

Key words irrigation; soil water; evapotranspiration; water budget

良好的绿洲生态系统是支持干旱地区可持续发展的前提。干旱区绿洲的社会经济发展,尤其是农业发展不断地消耗水资源^[1-2]。同时,用水效率低和水资源浪费等问题加剧绿洲水资源的短缺,导致下游水量减少和荒漠化现象。灌溉是绿洲农业发展的根本,没有灌溉就没有干旱区农业^[3]。随着灌溉面积的扩大和社会经济的快速发展^[4-5],绿洲生态用水与生产用水的矛盾日益突出^[6],干旱区水系统对人类活动的影响也更加敏感。同时,大规模引水灌溉造成的灌区地下水位抬升和土壤盐碱化也严重地阻碍区域农业发展^[7]。

作为生态系统中物质平衡的一部分,水分收支可以综合地反映区域环境中植被、土壤和小气候的相互响应以及水文特征^[8]。但是,由于荒漠绿洲过渡带气象要素以及区域内外水热交换的不确定性,难以获得精确的水分收支动态变化过程。其中,土壤含水量直接或间接地控制着土壤-植被-大气连续体中的植被条件、土壤理化性质和地下水动态^[4-5],因此土壤含水量的变化既关系水分的收入项,也关系水分的输出项^[6-7]。蒸散发是地表水量平衡的重要组成部分,是地球水循环中关键的水文过程之一^[9],也是陆地表面“土壤-植物-大气”系统水分消耗的主要途径^[8]。在全球陆地水循环过程中,陆地

多年平均蒸散发量占多年平均降水量的61%^[10],在干旱区甚至高达90%。Contreras等^[11]利用遥感影像研究阿根廷中部的蒸散发,发现灌溉绿洲的年蒸散发量可达 586 ± 22.49 mm。Suyker等^[12]发现生长季经过灌溉的玉米地蒸散量为452 mm,比生长期降水事件后的蒸散量高12%。王兵等^[13]对民勤绿洲-荒漠区的研究显示,水分输入大部分靠降水和土壤水分的水平运动补给,蒸散发是系统的主要输出项。雷志栋等^[14]对喀什噶尔河和叶尔羌河绿洲灌溉地的研究结果表明,消耗项中蒸散发可达80%~90%,渗漏补给可达14%,降水可达2%。

水资源的合理开发利用是维系绿洲生态系统的关键,水分收支的准确量化是合理利用水资源的前提。因此,本研究通过野外现场观测,定量地探究绿洲水分收支规律,明确绿洲的土壤水分和蒸散发特征,并探求灌溉这一额外的水分收入项对水分收支状况的影响,以为绿洲保护和水资源持续利用提供科学指导。

1 研究区概况

如图1所示,张掖市地处甘肃河西走廊中部,黑河流域中上游,属于温带大陆性气候区,干旱指数为15。全年日照时数为3087小时,年太阳辐射量

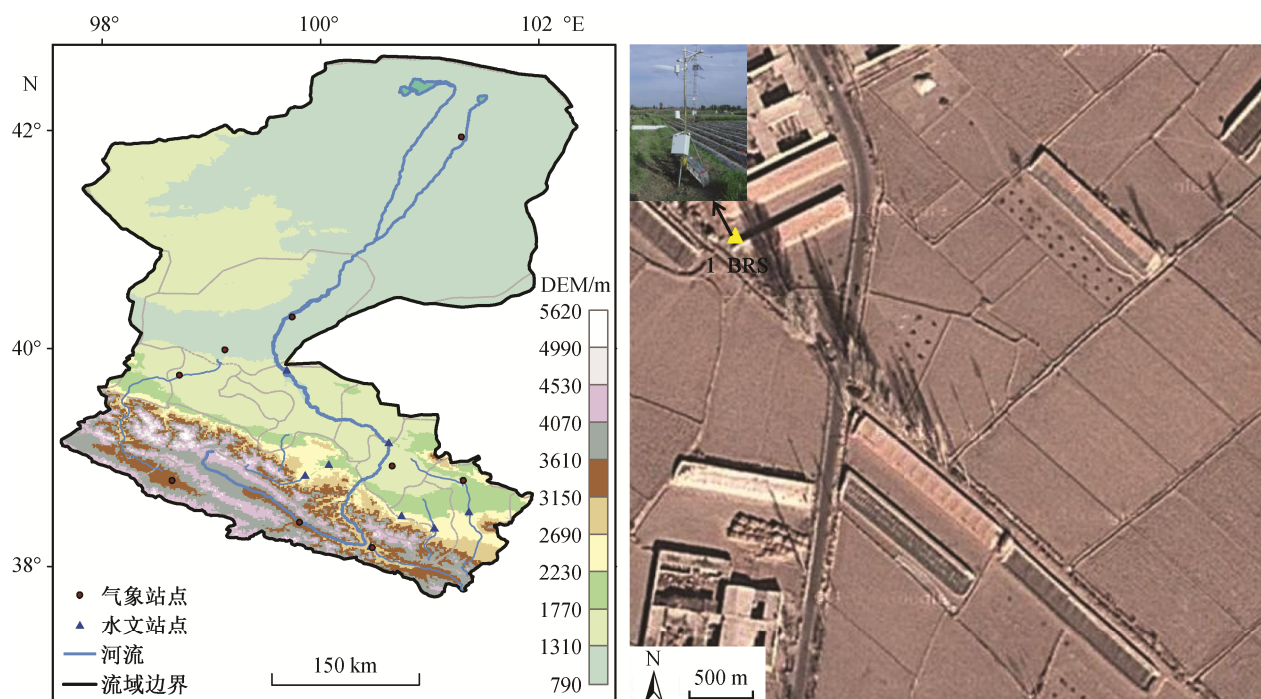


图1 研究区地理位置图以及试验地分布图(来自 Google Earth)

Fig. 1 Location map of study area in Heihe River Catchment and the Satellite image (from Google Earth) of observation

为133.36~148.42 kcal/cm², 年平均风速为2.07 m/s, 多年平均气温为7.47°C, 多年平均降水量为129.43 mm, 多年平均湿度为51.78%。地表水资源包括河流和冰川两部分, 河流主要有黑河及其支流梨园河、洪水河等26条, 均发源于祁连山高中山纵深地带; 冰川是地表径流稳定而持久的补给。该区总面积为4.19×10⁴ km², 适宜发展农业, 但由于降水量较少, 农业需水大多来自黑河。

经过野外勘察, 选取位于张掖市甘州区长安乡的绿洲观测区1号观测点, 架设波文比观测系统和土壤水分仪。该观测点地理坐标为38°53'34.4"N, 100°21'27.9"E, 主要植被类型是辣椒, 代表观测区典型的蔬菜种植区域。

2 研究方法

2.1 绿洲农田的水分支支

根据文献[15], 绿洲农田水分收支方程式为

$$P+I+CR+DW=ET+\Delta Q+R+DP, \quad (1)$$

式中, P 为降水量(mm), I 为灌溉量(mm), CR 为毛管上升水(mm), DW 为凝结水(mm), ET 为波文比实测蒸散发量($ET=E+T$, E 为土壤蒸发量, T 为植被蒸腾量)(mm), ΔQ 为土壤含水量的变化量(mm), R 为地表径流量(mm), DP 为下渗量(mm)。

张掖观测区属于农田生态系统, 水分输入项有降水、灌溉和凝结水。同时, 由于降水和灌溉强度较大, 会有渗漏现象发生^[16]。即, 输出项为蒸散发和渗漏。毛细上升流的作用可忽略不计, 凝结水因质量小且难观测可以假设为0。式(1)简化为:

$$P+I=ET+\Delta Q+DP. \quad (2)$$

本研究中, ET 通过波文比实测获得, I 通过实际观测获取, 土壤含水量测定0~100 cm土层, 通过累计两次灌溉或降水事件之间的土壤含水量变化值, 减去波文比法得出的正蒸散量累积值, 即可得到100 cm以下渗漏量。

2.2 波文比-能量平衡法

采用波文比能量平衡法^[17-18]计算平均蒸散发量。2012年6—9月在张掖辣椒地1号观测点架设波文比系统, 连续自动观测。观测的基础气象数据包括总辐射、光合有效辐射、净辐射、土壤热通量(5 cm深度, 2个重复)、2.5 m和1.0 m高度的温湿度, 传感器的信息见表1。气象站采用太阳能驱动, 利用数据采集仪(Campbell CR1000)连续自动观测和记录, 数据采集间隔为5 s, 记录间隔为10分钟。

表1 气象站观测要素

Table 1 Information of meteorological elements

观测要素	仪器型号	安装高度/m	测量精度
相对湿度和气温	Skye SKH 2060	2.5, 1.0	±2%, ±0.2°C
总辐射	Skye SKS 1110	3	<3%
光合有效辐射	Skye SKP 215	3	<3%
净辐射	Kipp & Zonen NR Lite 2	3	10 mV/(W·m ⁻²)
土壤热通量	HFP01, HUKSEFLUX	-0.05	50 μV/(W·m ⁻²)

2.3 土壤水分观测

土壤水分监测采用时域反射仪法, 观测生长季土壤水分随时间变化及垂直分布, 探讨降雨事件、入渗等对土壤水分影响。土壤水分仪(Delta-T SM300 soil moisture, Delta-T ML2x soil moisture, 英国)的埋深为2, 4, 10, 20, 40, 60和100 cm。2012年6月22日至9月16日, 每10分钟记录一次数据, 数据采集器是Campbell CR1000。

3 结果与讨论

3.1 绿洲农田的土壤水分特征

图2显示2012年6月22日至9月16日土壤水分日变化和降水量变化。将土壤分为0~20, 40~60和100 cm 3个深度, 观测期内0~20 cm的土壤含水量变化较大, 40~100 cm的土壤含水量整体上变化较小; 0~20, 40~60和100 cm的平均土壤含水量分别为0.368, 0.433和0.413 m³/m³。

从图2可知, 降水事件对0~20 cm的土壤含水量影响较大, 6月29日、7月9日和7月28—29日的降水事件导致0~20 cm的土壤含水量急剧增加, 100 cm处的土壤含水量受到的影响很小。选取观测期内降水强度最大的2012年7月9日(日降水总量为16.9 mm), 进一步探讨不同深度土壤含水量的日变化。从图3可以看出, 20~100 cm土层对降水几乎无响应, 2~10 cm土层对降水响应较大, 其中2 cm土层土壤含水量增加0.05 m³/m³, 且响应时间随着深度增加而增加, 2 cm响应时间为40分钟, 10 cm相应时间则为2小时。总的来说, 强降雨(16.9 mm以内)对绿洲观测区土壤含水量的影响限于2~10 cm土层, 20 cm以下土层对降水事件几乎无响应。

选取观测期内灌溉事件强度较大的2012年6月29日(总灌溉量为159.97 mm), 分析不同深度土壤含水量的日变化(图4)。可以发现, 土壤含水量在灌溉时刻有明显的突变, 2 cm土层土壤含水量在30分钟内增加0.240 m³/m³, 且在各个深度都有

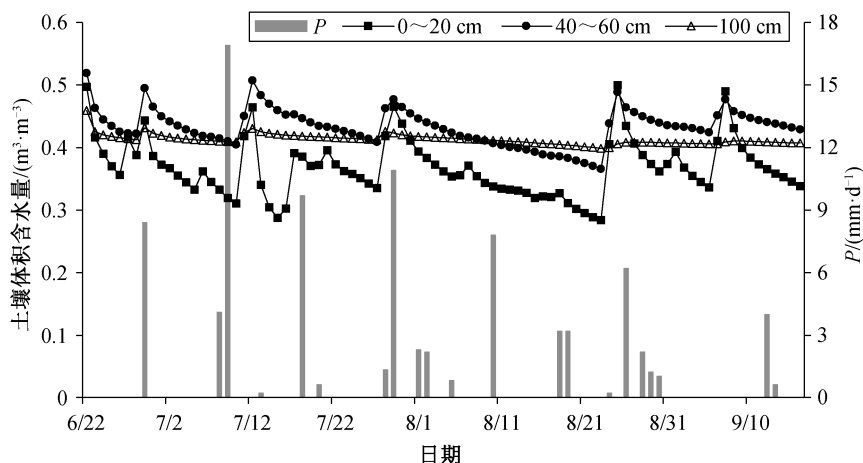


图2 绿洲区土壤体积含水量和降水量(P)日变化(2012年6月22日—9月16日)
Fig. 2 Daily variation of volumetric soil water content at the 0–100 cm soil profile and precipitation (P) in the oasis (June 22 to Sept. 16, 2012)

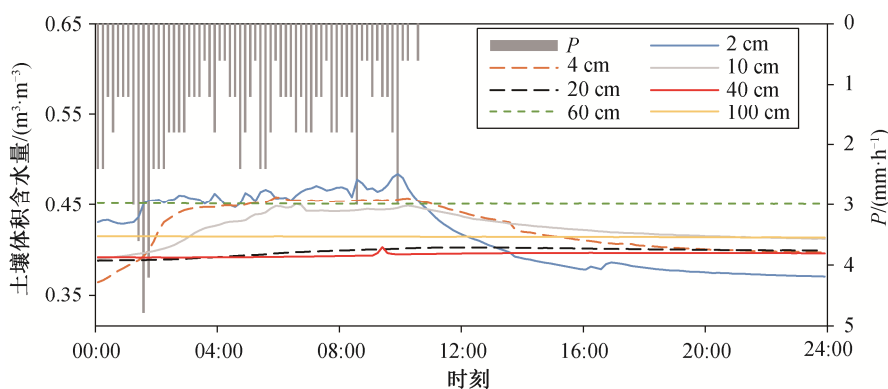


图3 绿洲降水日不同深度土壤体积含水量日内变化(2012年7月9日)
Fig. 3 Spatial pattern of volumetric soil water content at the 0–100 cm soil profile in the oasis during the day with precipitation (July 9, 2012)

明显的响应,其中100 cm处土壤含水量40分钟内增加 $0.050 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。灌溉事件后土壤发生下渗,各层土壤水分增加,对土壤水分的影响远大于降水事件。

总的来说,由于绿洲地表植被覆盖度高,表层土壤对降水的保持能力较强,因而强降雨条件下20 cm以下土层不会发生下渗。但是,由于灌溉强度大,对土壤含水量及其垂直变化产生较大影响,这一影响随着深度的增加逐渐变小。

3.2 绿洲农田的蒸散发变化

图5是2012年6月6日至9月16日的日蒸散量和日降水量变化。绿洲日蒸散量在 $0.59\sim 6.31 \text{ mm/d}$ 之间变化,平均日蒸散量为 2.83 mm/d 。观测期103天的总蒸散量为 291.6 mm ,总降水量 93.4 mm ,降水量占蒸散量的32.0%,说明绝大部分蒸散量并非来自降水。6—8月日蒸散量较大,在 $1.37\sim 6.31$

mm/d 之间变化,集中在 $2\sim 5 \text{ mm/d}$ 范围。8—9月日蒸散量较低,在 $0.59\sim 4.99 \text{ mm/d}$ 之间变化,集中在 $0.6\sim 4 \text{ mm/d}$ 范围。基于MODIS数据和三温模型方法,计算得出黑河流域的蒸散发量,中游灌溉绿洲的年蒸散发均值为 $331 \text{ mm}^{[19]}$,本文结果与之较为一致。何磊等^[20]采用波文比-能量平衡方法测得黑河流域中游生长季(6月15日—9月20日)农田蒸散发日均蒸散发为 $1.98\sim 4.04 \text{ mm/d}$,本文测定结果与之较为一致。

观测期内最大的一次降水事件发生在6月26—27日,降水总量为 21.0 mm 。分析该降水事件前后的日降水量和蒸散发量数据可以发现,6月26日蒸散发量为 3.98 mm/d ,6月27和28日分别为 1.71 和 1.48 mm/d ,之后蒸散速率显著提高,6月29日蒸散发量为 4.63 mm/d ,降水事件后3日蒸散量为灌溉

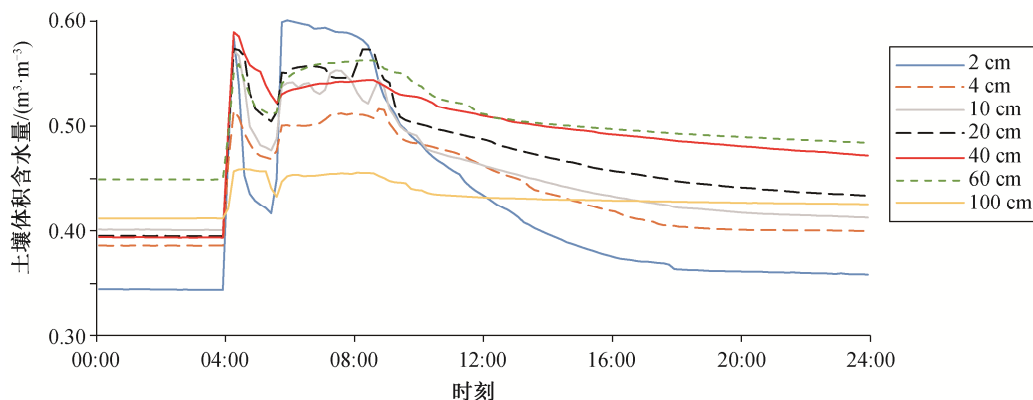


图4 绿洲灌溉日不同深度土壤体积含水量日内变化(2012年6月29日)

Fig. 4 Diurnal pattern of volumetric soil water content at the 0–100 cm soil profile in the oasis during the day with irrigation (June 29, 2012)

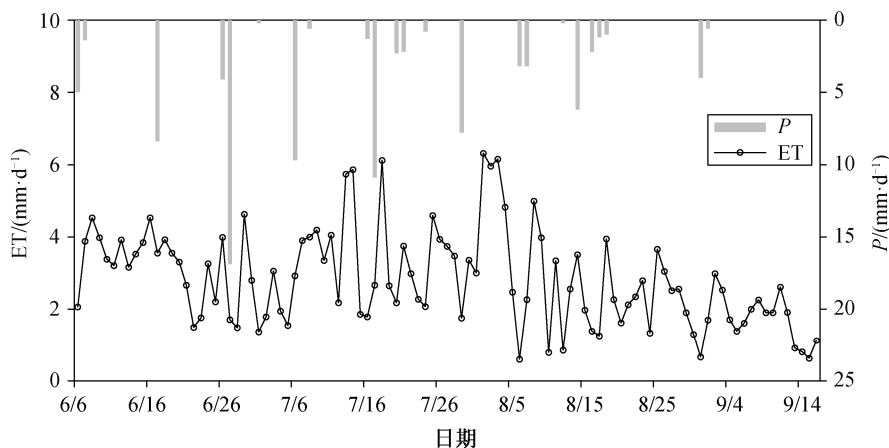


图5 绿洲日蒸散发量和降水量变化

Fig. 5 Variation of daily evapotranspiration and precipitation in the oasis

前的1.16倍,说明绿洲蒸散发对降水事件的响应有一定的滞后性。这是由于降水事件不会显著地改变植被覆盖度和植被蒸腾,主要通过增加土壤水分来增加蒸散发量,而土壤水分的增加需要一定的下渗时间。降水对植被生长的影响在生长季尤为明显。

灌溉等人为活动对绿洲水分收支各项也会产生较大的影响。为了明确灌溉对蒸散速率的影响,选取观测期最大的一次灌溉事件前后白天蒸散速率和灌溉量数据(图6)进行分析。灌溉事件发生在2012年7月11日和12日,灌溉总量为226.1 mm。灌溉当日蒸散速率变化不大,11日白天平均蒸散速率为0.33 mm/h,12日为0.19 mm/h,13日之后明显提高,13日白天平均蒸散速率为0.62 mm/h,14日略下降,为0.58 mm/h。Brunel等^[21]对叙利亚干旱绿洲的研究结果显示洪水事件后田间蒸散发速率显著升高,本文结果与之较为一致。灌溉日之后两日蒸散速率

为灌溉之前的1.88倍,主要是由于灌溉事件提供充足的水分条件,有利于绿洲地区的蒸散作用。

3.3 绿洲农田的水分收支特征

图7(a)显示生长季水分收支各项的变化。绿洲水分收入项为降水和灌溉,总量为765.85 mm,其中灌溉占89.7%,降水仅占10.3%。绿洲农田生态系统主要水分收入项为灌溉。

从图7(b)可以发现,水分支出项主要为深层渗漏,DP/(P+I)为81%,ET/(P+I)仅为38%,土壤含水量的变化量为17%。100 cm以下渗漏远远超出蒸散发,是主要的水分支出方式,大部分水分贮存在100 cm以下土壤中或成为地下水。

绿洲的ET/P为371%,蒸散量远远超出降水量,蒸散发的主要来源为灌溉水等其他水源。土壤含水量的变化量 ΔQ 为负值,原因可能在于观测期是植被生长旺盛期,蒸发消耗强烈,虽然生长季有较多

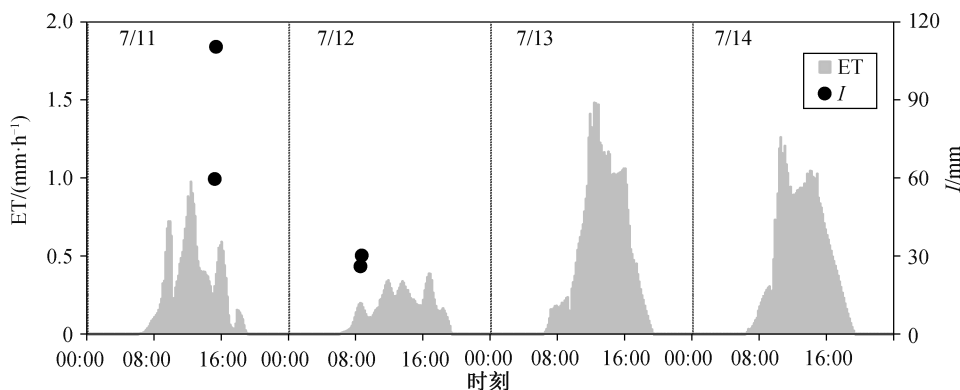


图6 绿洲灌溉前后白天蒸散速率变化及对应灌溉量(2012年7月11—14日)

Fig. 6 Diurnal variation of evapotranspiration pre- and post-irrigation measured by Bowen Ratio system in the oasis and corresponding irrigation (July 11–14, 2012)

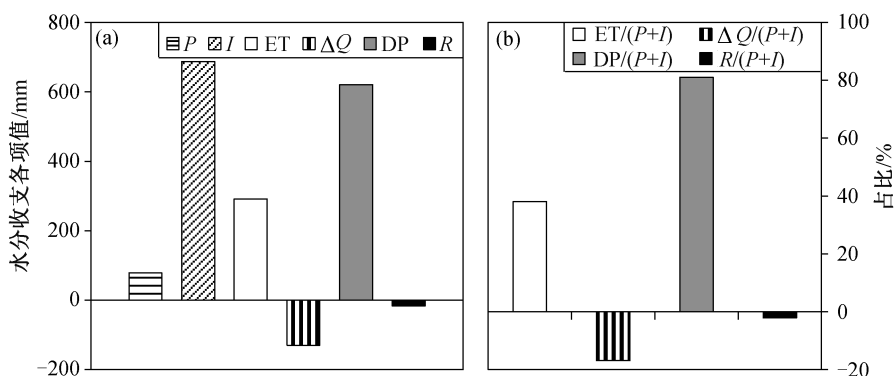


图7 绿洲观测区生长季水分收支各项值(a)及其占总水分收支项的比例(b)

Fig. 7 Water budget components (a) and its ratio (b) during growing season in the oasis

灌溉和降水事件,但大部分灌溉水以下渗水的形式储存在100 cm以下土壤中或成为地下水,因而呈现表层土壤变干的趋势。由于灌溉量和100 cm以下渗漏量并非实测数据而是通过土壤水分数据估算获得、波文比蒸散量比蒸渗仪蒸散法的测定值偏大^[22]、观测期外的降水或灌溉事件对水分平衡有一定程度的影响,各种因素导致最终的水分收支各项未达到精确的平衡,余项值(R)为 -16.50 mm,但比水分总收入项($R/(P+I) = -2.15\%$)小。总的来说,水分收支各项值较为准确,收支基本上达到平衡。

目前,张掖灌区作物生长需要的水分(ET)主要来源于降水和灌溉,因此灌溉需水量是作物需水量(ET)与降水量(P)之差^[23]。生长季灌溉需水量为 213.03 mm,实际灌溉量比灌溉需水量多 474.22 mm,远远超出所需,水资源浪费严重。原因在于当地农业大多采用大水漫灌方式,节水管理措施落后,节水意识差^[24]。建议通过推进亏缺灌溉方式降低农业用水配额,避免水资源浪费。

4 结论

本研究选取河西走廊的张掖作为研究区,通过研究绿洲的水分收支基本特征,明确绿洲的土壤水分和蒸散发特征,并探求灌溉这一额外的水分收入项对水分收支状况的影响,得到结论如下。

1) 无降水及灌溉时,研究区 $40\sim 60$ 和 100 cm的土壤含水量高于 $0\sim 20$ cm土壤,但 $0\sim 20$ cm土壤含水量波动较大。强降水事件对 $0\sim 20$ cm土壤含水量影响较大;灌溉事件对 $0\sim 100$ cm土壤含水量均有明显的影响,但随着深度增加,影响逐渐减小。灌溉对土壤含水量的影响远大于降水。

2) 无降水及灌溉时,研究区的日均蒸散量为 2.83 mm/d,降水事件后3日为降水前的 1.16 倍,而灌溉事件之后两日蒸散速率为灌溉前的 1.88 倍,说明灌溉对绿洲的蒸散发影响更显著。此外,绿洲蒸散发对降水事件响应的滞后性更明显。

3) 绿洲水分收入项为降水和灌溉,其中灌溉占

89.7%, 降水仅占10.3%; 水分支出项主要为深层渗漏, $DP/(P+I)$ 为81%, $ET/(P+I)$ 仅为38%, 土壤含水量的变化量为17%。绿洲的 ET/P 为371%, 蒸散量远远超出降水量, 蒸散发的主要来源为灌溉水, 说明过量的灌溉水通过深层渗漏和蒸散发等方式耗散, 绿洲的水循环过程被人为增强。

4) 2012年生长季绿洲灌溉需水量为213.03 mm, 实际灌溉量比灌溉需水量多474.22 mm。张掖绿洲农业灌溉方式应改进, 建议减少单次灌溉量, 实行亏缺灌溉, 充分利用水资源, 提高农业用水效率。

参考文献

- [1] Li Cheng, Wang Yue, Qiu Guoyu. Water and energy consumption by agriculture in the Minqin Oasis Region. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(8): 1330–1340
- [2] Topak R, Süheri S, Acar B. Comparison of energy of irrigation regimes in sugar beet production in a semi-arid region. *Energy*, 2010, 35(12): 5464–5471
- [3] 高艳红, 陈玉春, 吕世华. 灌溉方式对现代绿洲影响的数值模拟. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 90–94
- [4] Hu Litang, Wang Zhongjing, Tian Wei, et al. Coupled surface water-groundwater model and its application in the Arid Shiyang River basin, China. *Hydrological Processes*, 2009, 23(14): 2033–2044
- [5] Huo Zailin, Feng Shaoyuan, Kang Shaozhong, et al. Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang River basin in arid north-west China. *Hydrological Processes*, 2008, 22(16): 3155–3167
- [6] 张治. 绿洲膜下滴灌农田水盐运移及动态关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2014
- [7] Tang Qihong, Hu Heping, Oki T. Groundwater recharge and discharge in a hyperarid alluvial plain (Akesu, Taklimakan Desert, China). *Hydrological Processes*, 2007, 21(10): 1345–1353
- [8] 刘俊明, 余新晓. 水文与水资源学. 北京: 中国林业出版社, 2007
- [9] Liu Changming, Zhang Xiying, Zhang Yongqiang. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109–120
- [10] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resource Research*, 2000, 36(1): 3–9
- [11] Contreras S, Jobbágy E G, Villagra P E, et al. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(1/2): 10–22
- [12] Suyker A E, Verma S B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2009, 149 (3/4): 443–452
- [13] 王兵, 崔向慧. 民勤绿洲-荒漠过渡区水量平衡规律研究. *生态学报*, 2004, 24(2): 235–240
- [14] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀, 等. 塔里木盆地绿洲耗水分析. *水利学报*, 2006, 37(12): 1470–1475
- [15] Gassmann M, Gardiol J, Serio L. Performance evaluation of evapotranspiration estimations in a model of soil water balance. *Meteorol Appl*, 2011, 18(2): 211–222
- [16] 杨艳昭, 封志明, 黄河清. 气候变化下西北地区农田水分平衡的模拟与分析. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 103–112
- [17] Bowen, I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 1926, 27(6): 779–787
- [18] Qiu Guoyu, Tan Shenglin, Wang Yue, et al. Characteristics of evapotranspiration of urban lawns in a subtropical megacity and its measurement by the ‘three temperature model + infrared remote sensing’ method. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 502
- [19] Tian Fei, Qiu Guoyu, Yang Yonghui, et al. Estimation of evapotranspiration and its partition based on an extended three-temperature model and MODIS products. *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 210–220
- [20] 何磊, 王瑶, 别强, 等. 基于SEBS-METRIC方法的黑河流域中游地区农田蒸散. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(4): 504–510
- [21] Brunel J P, Ihab J, Droubi A M, et al. Energy budget and actual evapotranspiration of an arid oasis ecosystem: Palmyra (Syria). *Agricultural Water Management*, 2006, 84(3): 213–220
- [22] 戚培同, 古松, 唐艳鸿, 等. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较. *生态学报*, 2008, 28(1): 201–211
- [23] 王鹤龄, 牛俊义, 王润元, 等. 气候变暖对河西走廊绿洲灌区主要作物需水量的影响. *草业学报*, 2011, 20(5): 245–251
- [24] 王兆华, 李立科, 赵二龙, 等. 西北地区水资源利用的问题与对策. *安徽农业科学*, 2008, 36(10): 4202–4204