

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0091

冯湘华,宋孝玉,覃琳,等. 肃南裕固族自治县天然草地植被生态需水研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 115-122, 148. FENG X H, SONG X Y, QIN L, et al. Ecological water requirement for natural grassland vegetation in the Sunan Yugur Autonomous County[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 115-122, 148. (in Chinese)

肃南裕固族自治县天然草地植被生态需水研究

冯湘华, 宋孝玉, 覃琳, 文望, 刘晓迪

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 针对内陆干旱草原区水资源日益短缺, 开展区内草地生态需水研究, 可为区域草原生态建设规划和水资源配置提供参考。选取肃南裕固族自治县作为内陆干旱草原区的典型代表区, 采用联合国粮农组织(FAO)推荐的干旱区受破坏非完全覆盖的天然植被生态需水计算方法, 研究了区域植被生长季(3—10月)参考作物蒸散发量随时间的趋势性变化及其空间分布特征, 分析了不同草地类型生态需水定额和有效降雨量的特征关系, 并通过对各乡镇天然草地生态需水量与生态缺水量计算发现: 肃南县在不同水文年均存在一定的生态缺水现象, 明花乡表现最为严重, 生态环境脆弱, 应积极改变牧区发展模式, 保护草地生态系统的和谐与稳定。

关键词: 内陆干旱草原区; 生态需水量; Penman-Monteith公式; 天然植被; 肃南县

中图分类号: X143; X174 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Ecological water requirement for natural grassland vegetation in the Sunan Yugur Autonomous County

FENG Xianghua, SONG Xiaoyu, QIN Lin, WEN Wang, LIU Xiaodi

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Estimation of ecological water requirement for natural grassland can provide reference for regional grassland ecological construction planning and water resources allocation, in order to solve the regional water shortage problems. The methods of estimating ecological water requirement for non-pristine and non-full coverage natural vegetation were proposed by FAO. The Sunan Yugu Autonomous County in the typical western pastoral areas was chosen as a case study in this paper. The reference crop evapotranspiration of vegetation in the regional and its trend in the crop growing season from March to October were computed. The characteristics of the relationship between effective precipitation and ecological water requirement quota for different grassland types were also investigated. It is found that the Sunan County had a shortage of ecological water requirement at all different hydrological years, while comparing demands and supply. The situation is more serious in the Minghua, implying its fragile ecological environment. The regional development planning should be adjusted to ensure the harmony and stability of grassland ecosystems.

Key words: inland arid grassland; ecological water requirement; Penman-Monteith equation; natural vegetation; Sunan county

草原是地球上分布最广的植被类型, 是我国陆地生态系统最大的天然屏障^[1]。作为陆地生态系统

收稿日期: 2018-12-18 修回日期: 2019-03-08 网络出版时间: 2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190321.1527.015.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400301)

作者简介: 冯湘华(1994—), 男, 四川广元人, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: 1042067132@qq.com

通信作者: 宋孝玉(1971—), 女, 陕西安康人, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: songxy@xaut.edu.cn

中一个重要的子系统,草地生态系统在全球变化、全球循环和生态系统功能等方面起着非常关键的作用^[2]。近年来,随着全球气候变化和人类活动干扰的增加,草地生态系统发生明显退化,整体生态环境受到破坏,而退化生态系统恢复与重建的关键在于恢复植被^[3]。植被作为生态系统的生产者,是生态系统中物质循环与能量流动的中枢^[4]。因此植被生态需水量研究是整个生态系统生态需水量研究的基础^[5]。

植被生态需水是指维持植被正常生长、植被生态系统动态平衡和健康发展所需要消耗的水量^[6-7]。目前,有关植被生态需水已获取了大量的研究成果^[8-10],其中闵庆文等^[11]在对泾河流域草地生态需水量估算时指出天然牧草生态需水量,是在环境相似的草原地区,有规律群集在一起,能重复出现自然生长的整个原始牧草群体(亦称群落)的蒸发蒸腾(棵间蒸发与叶面蒸腾)量之和。Yu Zhang 等^[12]基于 SEBS 模型和粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式模拟了伊犁河流域草原的生态需水量。总结目前研究成果,生态需水量的计算大都基于通过计算不同植被类型的生态需水量来得到植被生态需水总量,未见有对典型草原天然草地类型分类需水量的研究。

随着草地保护政策的推行,以草地节水灌溉为主的牧区灌溉人工草地的建设已然成为保障牧民民生和草原生态以及解决畜草矛盾和生态恶化的重要措施^[13]。所以针对内陆干旱草原区水资源日益短缺,如何平衡天然草原和人工草地耗水的关系,就更需要解决天然草地的生态需水问题。故本次研究以肃南县作为内陆干旱草原区的典型区域,区内草地作为主要的植被类型,通过对不同代表区域不同草地类型典型水文年生态需水量的计算,为区域草地生态系统的植被恢复提供科学依据以及对区域水资

源的合理配置与实现生态可持续发展提供重要的技术支撑。

1 区域概况及研究方法

1.1 研究区概况

肃南裕固族自治县(97°21′~102°13′E, 37°28′~39°49′N)是全国唯一的裕固族自治县,地处河西走廊中部、祁连山北麓一线,整个地貌分河西走廊前山倾斜平原区、祁连山中高山区和走廊平原区三个地形单元。全县年平均降雨量 267.1 mm,多年平均蒸发量为 1 784 mm,年平均气温 3.6 ℃,日照时数 3 085 h,无霜期 83 d 左右。区内水资源丰富,为河西内陆河流的主要产流区,整个地带涉及石羊河、黑河、疏勒河三大水系,年径流总量 43.11 亿 m³。总土地面积约 2.4 万 km²,区内草地占据了肃南县土地资源的主体部分,是甘肃省主要畜牧业县之一。

1.2 数据来源和预处理

本次研究收集了中国气象数据共享网中肃南县周边酒泉、高台、张掖、永昌、祁连、托勒、野牛沟 7 个国家基准气象站 1960—2016 年共 57 年的逐日数据集,包括相对湿度、气温、气压、风向、风速、降水以及日照时数等气象数据,对于部分站点小部分缺失数据,采用邻近站点插补法补齐。通过在 ArcGIS 平台下,将收集到的肃南县草原植被类型图、肃南县土地利用现状图、肃南县行政区划矢量化图,计算得到各乡镇辖区各类草原植被面积 A_p 。根据站点分布,采用泰森多边形法划分站点代表区,结合草地分布特点确定区内应计算的草地类型,规定相邻站点代表区同一草地类型只计算一次,以确保植被系数(K_v)计算的可行性、准确性和合理性。肃南县周边气象站点及各乡镇草地类型面积分布情况见图 1。

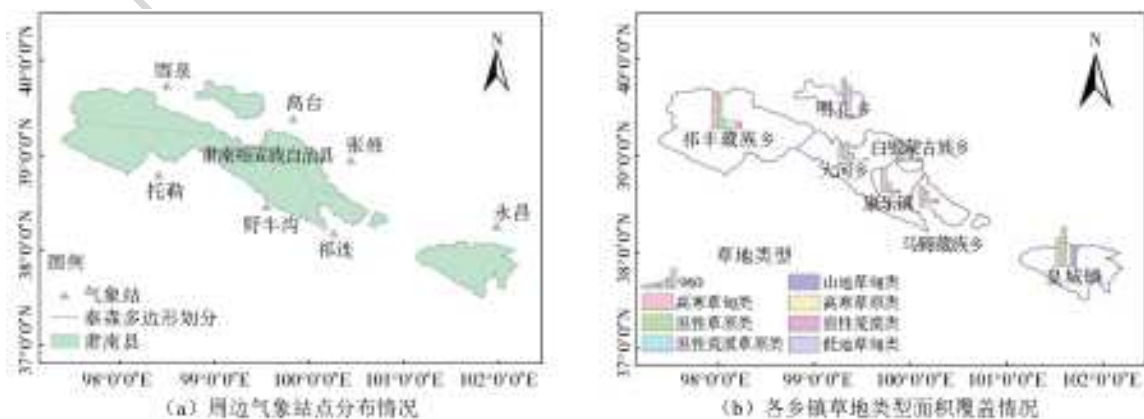


图 1 肃南县周边气象站点及各乡镇草地类型面积分布情况

Fig. 1 The meteorological stations and distribution of grassland in each township of the Sunan County

草原区牧草群落物候期参考肃南县草原工作站资料以及周边区域研究成果,根据邓少福^[14]基于遥感 NDVI 时间序列,采用 Logistic 函数拟合法提取得到周边气象站点的草地植被物候如返青时间、结束时间和生长季长度,并结合赵珍^[15]对祁连山植被物候变化影响因素的研究成果,划分各草原类型的生育期(见表 2)。根据植被生态需水量的定义,干旱区植被生态需水量的主体是在其生育期正常生长的耗水量^[6-7,16]。因此本次生态需水量研究的计算时段即为各类草原生育期,确定区域生长季为 3—

10 月。

1.3 研究方法

植被生态需水计算根据植被类型划分生态需水类型,并确定其范围、面积和生态需水定额。由于植物的生态需水定额不仅与气候条件、土壤质地等自然因素有关,而且与群落类型、植物种类等有关,因此要针对每一代表区域、每一土地类型、每一林草类型分别计算其各自的生态需水定额,再计算生态需水,其计算结果才能比较准确^[17]。肃南县周边各站点代表区草地生育期划分见表 1。

表 1 肃南县周边各站点代表区草地生育期划分

Tab. 1 Growth stages of the grassland in different climate zones in the Sunan County

代表区	草原分类	海拔范围/m	初始生长期	快速生育期	生育中期	生育后期	生长季长度/d
永昌	山地草甸类	2 800~3 000	4 月 8 日—6 月 4 日	6 月 5 日—7 月 7 日	7 月 8 日—8 月 26 日	8 月 27 日—9 月 20 日	166
	温性草原类	2 400~2 800	4 月 3 日—6 月 2 日	6 月 3 日—7 月 7 日	7 月 8 日—8 月 29 日	8 月 30 日—9 月 24 日	175
	高寒草甸类	3 500~4 100	4 月 17 日—6 月 6 日	6 月 7 日—7 月 4 日	7 月 5 日—8 月 17 日	8 月 18 日—9 月 10 日	147
酒泉	温性荒漠类	1 400~1 500	4 月 4 日—6 月 4 日	6 月 5 日—7 月 9 日	7 月 10 日—8 月 31 日	9 月 1 日—9 月 27 日	177
	低地草甸类	1 300~1 500	4 月 4 日—6 月 4 日	6 月 5 日—7 月 9 日	7 月 10 日—8 月 31 日	9 月 1 日—9 月 27 日	177
	温性荒漠草原类	2 300~2 450	4 月 13 日—6 月 7 日	6 月 8 日—7 月 9 日	7 月 10 日—8 月 26 日	8 月 27 日—9 月 18 日	159
	温性草原类	2 400~2 800	4 月 16 日—6 月 7 日	6 月 8 日—7 月 7 日	7 月 8 日—8 月 22 日	8 月 22 日—9 月 15 日	153
高台	温性荒漠草原类	2 300~2 450	3 月 29 日—5 月 28 日	5 月 29 日—7 月 02 日	7 月 3 日—8 月 23 日	8 月 24 日—9 月 18 日	174
	温性荒漠类	1 400~1 500	3 月 18 日—5 月 24 日	5 月 25 日—7 月 2 日	7 月 3 日—8 月 29 日	8 月 30 日—9 月 27 日	194
张掖	温性草原类	2 400~2 800	4 月 5 日—5 月 30 日	5 月 31 日—7 月 1 日	7 月 2 日—8 月 18 日	8 月 19 日—9 月 10 日	159
	温性荒漠草原类	2 300~2 450	4 月 2 日—5 月 28 日	5 月 29 日—6 月 30 日	7 月 1 日—8 月 18 日	8 月 19 日—9 月 12 日	164
	山地草甸类	2 800~3 000	4 月 8 日—5 月 30 日	5 月 31 日—6 月 29 日	6 月 30 日—8 月 14 日	8 月 15 日—9 月 7 日	153
祁连	高寒草甸类	3 500~4 100	4 月 26 日—6 月 16 日	6 月 17 日—7 月 16 日	7 月 17 日—8 月 30 日	8 月 31 日—9 月 21 日	149
托勒	高寒草原类	3 000~3 800	4 月 23 日—6 月 15 日	6 月 16 日—7 月 17 日	7 月 18 日—8 月 31 日	9 月 1 日—9 月 23 日	154
	高寒草甸类	3 500~4 100	4 月 25 日—6 月 15 日	6 月 16 日—7 月 15 日	7 月 16 日—8 月 28 日	8 月 29 日—9 月 19 日	148
野牛沟	高寒草甸类	3 500~4 100	4 月 25 日—6 月 15 日	6 月 16 日—7 月 15 日	7 月 16 日—8 月 28 日	8 月 29 日—9 月 19 日	148

1.3.1 植被生态需水量计算

根据联合国粮农组织(FAO)^[18]推荐的干旱区受破坏非完全覆盖的天然植被生态需水计算方法,由于植被生长状况受到土壤含水量的影响,当含水量低于阈值,植被受水分胁迫,其影响由土壤水分限制系数 K_s 决定,此时的植被蒸散量(植被生态需水定额),即林草地生态系统单位面积、单位时间内所需消耗的水量可以按式(1)进行计算^[19-21]

$$ET_c = K_s \times K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中: ET_c 为植被蒸散量(mm); ET_0 为参考作物蒸腾量(mm); K_c 为植被系数; K_s 为土壤水分限制系数。刘娇^[21]在对黑河流域植被生态需水研究中采用遥感反演土壤含水量计算得到流域内各站点土壤水分限制系数,并对其成果的可行性进行了评估。而本次研究区域位于黑河流域主要的产汇流区,故研究中直接引用其研究成果,见表 2。

表 2 植被生长期内土壤水分限制系数 K_s

Tab. 2 Monthly water stress coefficient K_s

站点	植被生长期							
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
永昌站	0.04	0.01	0.23	0.22	0.32	0.31	0.49	0.35
酒泉站	0.13	0.44	0.16	0.36	0.32	0.32	0.44	0.33
高台站	0.05	0.02	0.16	0.18	0.33	0.05	0.10	0.05
张掖站	0.01	0.15	0.20	0.16	0.36	0.17	0.25	0.14
祁连站	0.15	0.14	0.03	0.22	0.23	0.3	0.35	0.12
托勒站	0.00	0.07	0.02	0.27	0.36	0.23	0.39	0.12
野牛沟站	0.06	0.04	0.01	0.23	0.24	0.26	0.39	0.02

植被生态需水量的计算考虑不同种类植被的覆盖面积 A_p , 其计算公式为

$$ET = ET_c \times A_p \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: ET 为植被生态需水量(m^3); A_p 为植被分布面积(m^2)。

(1) Penman-Monteith 公式

采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散发量。该公式全面考虑影响田间水分散失的大气因素和作物因素,把能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一起,1998 年,被联合国粮农组织将其推荐作为计算作物蒸发蒸腾量的一个标准计算方法,估值精度较高。其计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900 \times u_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: R_n 为冠层表面净辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); G 为土壤热通量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); T 为平均气温($^{\circ}\text{C}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压-气温关系曲线在 T 处的切线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2 m 高处的风速(m/s)。

(2) 植被系数计算

本文采用联合国粮农组织提出的分段单值平均作物系数法计算典型草原作物系数,即把作物系数的变化过程概化为生长初期、发育期、生长中期和生长后期四个阶段分别计算。生长初期植被系数 $K_{c,\text{ini}}$ 通过土壤被湿润的时间间隔与日平均 ET_0 确定^[17]。生长中期植被系数 $K_{c,\text{mid}}$ 和生长后期植被系数 $K_{c,\text{end}}$ 根据有效地表覆盖度确定,计算公式为

$$K_c = K_{c,\text{min}} + (K_{c,\text{full}} - K_{c,\text{min}}) \{ \min[1, 2f_p, (f_{p,\text{eff}})^{\frac{1}{1+n}}] \} \quad (4)$$

式中: $K_{c,\text{min}}$ 为植被缺少时裸露土壤最小植被系数($0.15 < K_{c,\text{min}} < 0.20$); $K_{c,\text{full}}$ 为全覆盖条件下的植被系数,可使用公式(5)计算; f_p 为地表植被实际覆盖度($0.01 < f_p < 1$),本文通过对 2008 年 7、8 月和 10 月份的 Landsat TM 影像解译并结合赵忠等^[22]对肃南裕固族自治县草原资源的调查成果获得; $f_{p,\text{eff}}$ 为有效植被覆盖度($0.01 < f_{p,\text{eff}} < 1$), $f_{p,\text{eff}} = \frac{f_p}{\sin\varphi} \leq 1$, φ 为太阳角平均值。

$$K_{c,\text{full}} = K_{c,h} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (5)$$

式中: RH_{min} 为计算时段内每日最小相对湿度的平均值(%); u_2 为计算时段内 2 m 高处的日平均风速的平均值(m/s); h 为计算时段内的平均株高(m); $K_{c,h}$ 为标准风速、湿度情况下的全覆盖植被系数,当 $h \geq 2$ 时, $K_{c,h} \leq 1.2$;当 $h < 2$ 时, $K_{c,h} = 1 + 0.1h$ 。

1.3.2 植被生态缺水计算

根据土壤水量平衡理论,植被生态系统的耗水

可以通过降水得到补给,但由于降水的时空变异,必然会有一部分植被的生态需水量得不到满足,使植被的生长受到限制,因此可以将植被生态需水中得不到满足的那部分水量称之为植被生态缺水量,即为植被生态需水量与区域内有效降雨量的差值,计算方法为

$$SEW_p = QEW_p \times A_p \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$QEW_p = ET_c - P_e \quad (7)$$

式中: SEW_p 为植被生态缺水量; QEW_p 为植被生态缺水定额; P_e 为有效降水量。

本次有效降雨量计算选取了 Petra Doll 等^[23,24]推荐的干旱地区有效降雨量计算方法,公式为

$$\begin{cases} P_{\text{eff}} = P(4.17 - 0.2P)/4.17 & P < 8.3 \\ P_{\text{eff}} = 4.17 - 0.1P & P \geq 8.3 \end{cases} \quad (8)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_{\text{eff}} \quad (9)$$

式中: P_{eff} 为日有效降雨量(mm); P 为日降水量(mm); P_e 为作物生育期内的有效降雨量(mm); n 为生育期天数(d)。

1.3.3 水分盈亏指数

作物水分亏缺指数^[25]是以生育期需水量为需水指标,以有效降雨量为供水指标,来反映作物供水量和需水量的平衡关系。

$$I = (P_e - ET_c) / ET_c \quad (10)$$

式中: I 为水分盈亏指数。当 $I > 0$ 时,表示水分有盈余;当 $I = 0$ 时,表示水分供需平衡;当 $I < 0$ 时,表示水分亏缺。

2 结果与分析

2.1 生长季 ET_0 时空变化特征

依据各站点的逐日气象资料,结合 Penman-Monteith 公式计算出各站点(1960—2016 年)逐日 ET_0 ,进而得到各站点年生长季参考作物蒸散量。利用线性趋势分析方法和 Mann-Kendall 趋势诊断方法^[26]分别对各站点年生长季参考作物蒸散量时间变化进行分析,表 3 为肃南县周边各站点 1960—2016 年生长季参考作物蒸散量(ET_0)特征值及趋势检验。

由表 3 可知,近 57 年来肃南县周边站点多年平均 ET_0 为 837.9 mm, ET_0 最大值出现在张掖站(2013 年,1 132.7 mm), ET_0 最小值出现在野牛沟站(1967 年,582.6 mm)。区域多年平均生长季 ET_0 线性倾向率为 6.7/(10a),各站点年生长季 ET_0 线性倾向率变化范围介于 -2.8~17。Mann-Kendall 趋势检验表明,仅有高台站年生长季 ET_0 呈下降趋势,其余各站均呈上升趋势,且永昌、张掖、

托勒站呈现显著增长的变化趋势,通过了显著水平 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

表 3 各站点年 ET_0 特征值及趋势检验

Tab. 3 Statistics and trend of annual ET_0 at meteorological stations

参考作物蒸散量 ET_0 /mm	永昌	张掖	酒泉	高台	祁连	托勒	野牛沟	肃南县
平均值	886.60	959.60	975.20	957.60	741.10	707.80	637.60	837.90
最大值	1 000.30	1 132.70	1 049.90	1 076.00	793.90	759.80	670.60	926.20
最小值	812.10	853.40	861.70	849.70	694.70	641.40	582.60	756.50
ET_0 线性倾向率/ $(10a)^{-1}$	11.30	17.00	5.00	-2.80	3.50	11.00	1.80	6.70
Z 值	3.21*	2.20*	1.65	-0.72	1.60	5.31*	1.61	1.04

注:Z 值为 Mann-Kendall 统计量; * 表示变化趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

在 ArcGIS 软件平台下采用反距离权重法 (IDW) 进行空间插值,绘制各站点年均生长季 ET_0 空间分布,结果见图 2。由图 2 可知,从 1960—2016 年,57 年间肃南县年均生长季 ET_0 由南向北逐步增加,从河西走廊平原区到祁连北麓中高山区随海拔高度增加生长季 ET_0 逐步减小。



图 2 1960—2016 年肃南县年均 ET_0 空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of annual average ET_0 in the Sunan County (1960 to 2016)

2.2 不同类型天然草地生态需水量计算

2.2.1 不同类型天然草地生态需水定额和有效降雨量分析

依据肃南裕固族自治县周边各站点 57 a 植被生长期的年降雨序列,根据频率分析法,确定各站点丰水年($P=25\%$)、平水年($P=50\%$)及枯水年($P=75\%$)的水文代表年份。结合前述方法对各站点不同水文年型下各草地类型的生态需水定额和生育期有效降雨量进行计算,并得到各草地类型的水分盈亏指数,计算结果详见表 4。

由表 4 可知,同一代表区不同草地类型生态需水定额不同,有效降雨量差异不大;不同代表区同一草地类型的生态需水定额也存在一定差异,有效降雨量差异较大。这主要受不同站点代表区气候要素、土壤水分含量和植被蒸散发能力的影响,如在高台、酒泉、张掖各站点代表区内降雨量少,而蒸散量

表 4 肃南县周边各气象站不同草地类型典型水文年全生育期水分满足情况

Tab. 4 The water satisfaction in typical hydrological years for different grassland types at meteorological stations in the Sunan County

代表区	草地类型	生态需水定额/mm			有效降雨量/mm			水分盈亏指数/%		
		丰	平	枯	丰	平	枯	丰	平	枯
永昌	山地草甸类	122.4	131.8	137.5	131.0	108.6	94.6	7.03	-17.60	-31.20
	温性草原类	120.5	130.0	136.4	142.1	109.7	94.6	17.93	-15.62	-30.65
	高寒草甸类	107.4	117.3	119.6	119.6	101.2	95.3	11.36	-13.73	-20.32
酒泉	温性荒漠类	115.3	127.7	128.1	59.8	55.1	29.2	-48.14	-56.85	-77.21
	低地草甸类	118.4	133.4	131.0	59.8	55.1	29.2	-49.49	-58.70	-77.71
	温性荒漠草原类	111.4	126.3	124.6	59.8	55.1	28.8	-46.32	-56.37	-76.89
高台	温性荒漠草原类	63.6	64.9	70.1	71.2	56.4	33.3	11.95	-13.10	-52.50
	温性荒漠类	61.2	62.5	67.2	77.4	59.4	40.6	26.47	-4.96	-39.58
张掖	温性草原类	99.5	108.3	113.3	80.4	76.6	61.9	-19.20	-29.27	-45.37
	温性荒漠草原类	85.2	92.8	97.1	80.5	76.6	61.9	-5.52	-17.46	-36.25
	山地草甸类	101.4	111.3	116.0	80.3	75.7	61.7	-20.81	-31.99	-46.81
祁连	高寒草甸类	82.8	84.8	89.8	236.9	200.7	190.3	186.11	136.67	111.92
托勒	高寒草原类	51.9	53.2	53.0	180.4	156.2	146.4	247.59	193.61	176.23
	高寒草甸类	80.5	81.8	82.2	180.4	156.2	146.4	124.10	90.95	78.10
野牛沟	高寒草甸类	68.9	71.9	73.0	246.3	228.7	191.7	257.47	218.08	162.60

较高,故生态需水定额大于有效降雨量,属于水分亏缺状态,其中高台站生态需水定额因受土壤水分含量因素限制的影响较大而呈现差异,均小于其它代表区同类型草地的生态需水定额;在托勒、野牛沟、祁连各站点代表区内降雨量丰富,且蒸散量较低,有效降雨量均大于草地生态需水定额,水分有盈余,故区内降雨量能够满足天然草地正常生长的需水,影响野牛沟站生态需水定额出现较大差异的主要因素则为植被蒸散发能力。总体来看,肃南县山地草甸

类生态需水定额最大,均大于同一代表区其它草地类型,高寒草原类生态需水定额最小;酒泉代表区内草地水分亏缺较为严重,均已接近或超过 50%。

2.2.2 不同类型天然草地生态需水量与生态缺水分析

根据前述方法进一步计算得到肃南县各乡镇辖区不同类型天然草地不同水文年生态需水量和生态缺水水量,分布情况见图 3、4。各乡镇辖区不同水文年型下生态需水量和生态缺水水量计算结果见表 5。



图 3 肃南县各乡镇典型水文年不同类型草地生态需水量分布情况

Fig. 3 Distribution of ecological water requirement for different grassland types in typical hydrological years at township scale in the Sunan County



图 4 肃南县各乡镇典型水文年不同类型草地生态缺水水量分布情况

Fig. 4 Distribution of ecological water shortage for different grassland types in typical hydrological years at township scale in the Sunan County

表 5 肃南县各乡镇天然草地生态需水量和生态缺水水量

Tab. 5 Ecological water requirement and ecological water shortage of natural grassland at township scale in the Sunan County

行政区	生态需水量/万 m ³			生态缺水水量/万 m ³		
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年
皇城镇	35 381.8	38 304.9	39 768.8	0.0	5 930.5	10 936.4
康乐镇	14 613.5	15 293.8	16 123.0	897.5	1 544.5	2 534.2
马蹄藏族乡	14 257.7	15 073.0	15 856.0	1 272.6	2 202.9	3 603.4
白银蒙古族乡	3 958.2	4 246.8	4 468.8	346.0	783.1	1 733.1
大河乡	16 508.8	17 465.0	18 219.4	1 383.1	2 745.9	5 805.2
明花乡	14 450.9	16 005.1	16 055.2	6 956.0	9 099.2	12 395.5
祁丰藏族乡	38 710.7	41 582.3	41 376.6	9 306.8	12 656.8	16 936.6
肃南县	137 881.6	147 970.9	151 867.8	20 162.0	34 962.9	53 944.4

由图 3、4 可以看出,除明花乡外,其它各区域内温性草原类和高寒草甸类草地生态需水量占据了区域生态需水总量的大部分比例,且各区域草地生态缺水水量主要表现为温性草原类草地缺水,从丰水年到枯水年,随着其它类型草地表现出缺水现象,温性草原类草地缺水水量占据比例逐步变小。

由表 5 可以看出,肃南县各区域只有皇城镇在

丰水年情形下不存在生态缺水情况,结合图 1 可知,造成各乡镇生态需水量差异较大的因素归因于各区域植被面积的不一致。从生态缺水水量数值来看,虽然祁丰藏族乡缺水水量最大,但对比各乡镇需、缺水水量,不难发现明花乡为草地植被生态缺水情况最为严重的地区,这与该地区降水量少蒸发量大是相对应的。肃南县各典型水文年型下天然草地生态需水

总量为丰水年137 881.6万 m³、平水年147 970.9万 m³、枯水年151 867.8万 m³,天然草地生态缺水总量为丰水年20 162万 m³、平水年34 962.9万 m³、枯水年53 944.4万 m³。由此可知肃南县草地植被生长期降雨难以满足相应草地的生态需水量,生态环境脆弱,只有确定合理的载畜量以及放牧方式才能实现草地的可持续利用,保证草原生态建设。

3 结 论

本研究基于农业气象学原理,采用了FAO推荐的受破坏非完全覆盖条件下的天然植被生态需水的计算方法,并利用有关研究成果,分析了1960—2016年肃南县参考作物蒸散发量的空间分布特征和时间趋势变化,并对不同代表区不同草地类型典型水文年生态需水定额和有效降雨量特征进行分析,完成了不同类型天然草地生态需水与降水资源的平衡分析,最后在GIS平台下展现出不同区域典型水文年各草地类型生态需水量和生态缺水占比,得到各乡镇典型水文年生态需水量和生态缺水水量。

(1)区域多年平均生长季 ET_0 线性倾向率为6.7/(10a),Mann-Kendall趋势检验表明,仅有高台站年生长季 ET_0 呈下降趋势,其余各站均呈上升趋势,且永昌、张掖、托勒站呈现显著增长的变化趋势。从1960—2016年,57年间肃南县年均生长季 ET_0 由南向北逐步增加,从河西走廊平原区到祁连北麓中高山区随海拔高度增加生长季 ET_0 逐步减小。

(2)同一代表区不同草地类型生态需水定额不同,有效降雨量差异不大;不同代表区同一草地类型的生态需水定额也存在一定差异,有效降雨量差异较大。总体来看,肃南县山地草甸类生态需水定额最大,均大于同一代表区其它草地类型,高寒草原类生态需水定额最小;酒泉代表区内草地水分亏缺较为严重,均已接近或超过50%。

(3)除明花乡外,其它各区域内温性草原类和高寒草甸类草地生态需水量占据了区域生态需水总量的大部分比例,且各区域草地生态缺水主要表现为温性草原类草地缺水。肃南县各典型水文年型下天然草地生态需水总量为丰水年137 881.6万 m³、平水年147 970.9万 m³、枯水年151 867.8万 m³,天然草地生态缺水总量为丰水年20 162万 m³、平水年34 962.9万 m³、枯水年53 944.4万 m³,只有皇城镇在丰水年情形下不存在生态缺水情况,且明花乡为草地植被生态缺水情况最为严重的地区。

综上所述,通过对肃南县天然草地生态需水量

的分析计算,能够进一步明确牧区草地生态状况,可为牧区灌溉人工草地建设提供水资源配置思路。而肃南县作为内陆干旱草原区的典型牧区,其生态需水研究成果可为内陆干旱草原区草地生态建设及植被恢复提供重要的参考数据。

参考文献(References):

- [1] 任继周,梁天刚,林慧龙,等.草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究[J].草业学报,2011,20(2):1-22. (REN J Z, LIANG T G, LIN H L, et al. Study on grassland's responses to global climate change and its carbon sequestration potentials[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 1-22. (in Chinese)) DOI: 10.11686/cyxb20110201.
- [2] 赵宇豪,戎战磊,张玉凤,等.近30年黑河流域草地变化分析及分布格局预测[J].草业学报,2017,26(6):1-15. (ZHAO Y H, RONG Z L, ZHANG Y F, et al. Analysis of change in grassland area in the Heihe River basin over the past 30 years and prediction of future trends[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(6): 1-15. (in Chinese)) DOI: 10.11686/cyxb2016294.
- [3] 郝博,粟晓玲,马孝义.甘肃省民勤县天然植被生态需水研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(2):158-164. (HAO B, SU X L, MA X Y. Study on ecological water requirement for natural vegetation in Minqin County of Gansu Province[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2010, 38(2): 158-164. (in Chinese)) DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2010.02.002.
- [4] 宋永昌.植被生态学[M].上海:华东师范大学出版社,2001. (SONG Y C. Vegetation Ecology[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001. (in Chinese))
- [5] 张丽,李丽娟,梁丽乔,等.流域生态需水的理论及计算研究进展[J].农业工程学报,2008,24(7):307-312. (ZHANG L, LI L J, LIANG L Q, et al. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 307-312. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2008.07.064.
- [6] 粟晓玲,康绍忠.生态需水的概念及其计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):740-744. (SU X L, KANG S Z. Concept of ecological water requirement and its estimation method[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 740-744. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2003.06.013.
- [7] 夏哲超,潘志华,安萍莉.生态恢复目标下的生态需水内涵探讨[J].中国农业资源与区划,2007,28(4):5-8.

- (XIA Z C, PAN Z H, AN P L. Discussion on the connotation of ecological water requirement under the target of ecology recovery[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2007, 28(4): 5-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-9121. 2007. 04. 002.
- [8] 叶红梅, 陈少辉, 盛丰. 疏勒河灌区 2000—2014 年植被生态适宜需水动态研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 231-240. (YE H M, CHEN S H, SHENG F. Dynamic estimation for vegetation ecological water demand in Shule River irrigation district during 2000—2014[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 231-240. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2016. 0026.
- [9] 周晓东. 基于 GIS 的云南小江流域植被生态需水量时空分布规律[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017. (ZHOU X D. Study on the spatial and temporal of vegetation ecological water requirement in Xiaojiang basin Yunnan province based on GIS[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2017. (in Chinese))
- [10] 曾建军. 景观格局变化背景下疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. (ZEN J J. Change of ecological carrying capacity and ecological water demand along with landscape pattern evolution in Shule River basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese))
- [11] 闵庆文, 耿艳辉. 泾河流域草地生态需水量的估算与分析[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 14-17. (MIN Q W, GENG Y H. Estimation and analysis of ecological water requirement in the Jinghe watershed[J]. Resources Science, 2005, 27(4): 14-17. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1007-7588. 2005. 04. 003.
- [12] ZHANG Y, YANG S, OUYANG W, et al. Applying multi-source remote sensing data on estimating ecological water requirement of grassland in ungauged region[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2(1): 953-963. DOI: 10. 1016/j. proenv. 2010. 10. 107.
- [13] 李和平. 荒漠化草原生态系统中可控水草畜平衡管理阈值研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008. (LI H P. Study on management threshold of controllable water-grass-livestock system in desertification grassland ecosystem[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y1307753.
- [14] 邓少福. 祁连山气候变化对植被的影响研究(2000-2011)[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (DENG S F. Impacts of climate change on vegetation in Qilian mountains from 2000 to 2011[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese))
- [15] 赵珍. 祁连山植被物候期变化及其对地理要素的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016. (ZHAO Z. The research of the phenology change and it's response to geographical elements in Qilian mountains from 1982 to 2014[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016. (in Chinese))
- [16] 马心依. 黑河流域中游地区生态环境需水研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. (MA X Y. Ecological and environmental water requirement in the middle reaches of Heihe River basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese))
- [17] 何京丽. 半干旱草原植被建设生态需水相关问题的探讨[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 271-272, 275. (HE J L. Discussion on the corresponding problems of ecological water requirement for vegetation construction in semi-arid grasslands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 271-272, 275. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3409. 2006. 06. 085.
- [18] ALLEN R G, SMITH M, PERRIER A. Crop evaporation, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [19] 吴建强, 李林, 谭娟, 等. 峰丛洼地植被生态需水定额及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6894-6902. (WU J Q, LI L, TAN J, et al. Ecological-water requirement of vegetation and its driving factors in karst peek-cluster area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6894-6902. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201707031197.
- [20] 王改玲, 王青杵, 石生新. 山西省永定河流域林草植被生态需水研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1743-1753. (WANG G L, WANG Q C, SHI S X. Vegetation's ecological water requirement in Yongding River watershed in Shanxi Province[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(10): 1743-1753. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2013. 10. 009.
- [21] 刘娇. 基于 3S 技术的黑河流域植被生态需水量研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. (LIU J. Study on the vegetation ecological water requirement in the Heihe River basin based on 3s technology[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese))
- [22] 赵忠, 何毅, 李青, 等. 肃南裕固族自治县草原资源调查[J]. 草业学报, 2010, 19(6): 231-247. (ZHAO Z, HE Y, LI Q, et al. Grassland investigation in Sunan Yuguor Autonomous County[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(6): 231-247. (in Chinese)) DOI: 10. 11686/cyxb20100631.

(下转第 148 页)

- [18] 詹道江,徐向阳,陈元芳. 工程水文学(第 4 版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010:154-157. (ZHAN D J, XU X Y, CHEN Y F. Engineering Hydrology (4th Edition) [M]. Beijing: China Water&Power Press;2010:154-157. (in Chinese))
- [19] 闫宝伟,潘增,薛野,等. 论水文计算中的相关性分析方法[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1039-1046. (YAN B W, PAN Z, XUE Y, et al. Modeling dependence and correlation in hydrological calculation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1039-1046. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20161280.
- [20] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京:科学出版社, 2005. (MING D X. Field experiment and statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [21] 金平斌,徐鹏飞. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的城镇化进程及格局研究——以杭州市为例[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(4): 205-213. (JIN P B, XU P F. A study of urbanization progress and spatial pattern using DMSP/OLS nighttime light data; A case study of Hangzhou City[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017, 29(4): 205-213. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2017. 04. 31.

(上接第 122 页)

- [23] FANKHAUSER S, TOL R S J. On climate change and economic growth[J]. Resource & Energy Economics, 2005, 27(1): 1-17. DOI: 10. 1016/j. reseneeco. 2004. 03. 003.
- [24] 王小静. 西北旱区作物需水量对气候变化的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014. (WANG X J. The response of crop water requirement to climate change in the arid region of northwest China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese))
- [25] 魏新光,王铁良,李波,等. 辽宁省玉米地水分盈亏时空分布特征及灌溉模式分区研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 119-126. (WEI X G, WANG T L, LI B, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of maize water surplus deficit and irrigation mode partition in Liaoning Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 119-126. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2018. 23. 014.
- [26] 史超,夏军,余敦先,等. 气候变化下汉江上游林地植被生态需水量的时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 580-589. (SHI C, XIA J, SHE D X, et al. Temporal and spatial variation of ecological water requirement of forests in the upper reaches of the Hanjiang basin under climate change[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2016, 25(4): 580-589. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cj-lyzyyhj201604007.