文章编号: 1000-694X(2008)02-0326-06

基于 SPAC 原理建立内蒙古草原干旱指标

侯 琼[1], 陈素华[2], 乌兰巴特尔[2]
(1. 内蒙古气象科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: 利用近 20 多年气象资料和土壤水分及牧草产量资料, 采用对比分析和简化的水量平衡方法, 建立了典型草原、草甸草原、荒漠草原需水量及生长季内草地蒸散系数 (Kc) 随时间变化经验方程, 确定出不同草原类型区需水量和 Kc 系数, 草甸草原、典型草原和荒漠草原 4—9 月的需水量分别是 390 mm、360 mm 和 180 mm, 平均 Kc 系数为 0.62、0.58 和 0.30; 以 SPAC 理论为基础, 给出草原旱情指数(K)的计算方法, 结合牧草减产率(I), 提出干旱等级指标, 当 $0.8 > K \geqslant 0.6$、$25\% < I \leqslant 45\%$ 时为轻旱, $0.6 > K \geqslant 0.4$、$45\% < I \leqslant 65\%$ 时为中旱, $K < 0.4$、$I > 65\%$ 时为重旱。经 3 a 的使用检验, 指标的一致性达到 75.3%, 与牧业气象报表描述的旱情基本吻合, 结果比较理想。

关键词: 干旱指标; 草原; SPAC 原理
中图分类号: S812.1 文献标识码: A

干旱是内蒙古草原区的主要自然灾害, 也是导致荒漠化的主要自然驱动因子之一[1]。干旱指标的确定是草原干旱监测预警和评价的重要环节。目前对草原干旱指标的研究远不及对农业干旱指标的研究广泛和深入。评价干旱的方法有许多种, 由于考虑的角度不同, 评价指标各异, 比较常用的有降水量指标、Z 指数、土壤含水量指标、作物旱情指数及综合性旱情指标等[2-7]。对于草原干旱指标, 应用最广泛的是降水指标, 土壤水分指标和牧草生理生态指标也有一些应用[8-10], 总体上, 多局限于单因子指标, 考虑多因子的综合指标很少。

由于草原干旱的形成是草原生态系统中各界面水分不平衡出现亏缺而造成的牧草生物量减少的现象。因此, 依据 SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum)原理[11-12], 从土壤供水, 牧草需水和大气环境供耗水的角度分析确定干旱指标, 可以弥补其他评价方法的不足。以内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原为研究对象, 利用实际观测资料, 以水分平衡原理为基础, 通过分析确定不同时段牧草需水量和草地群落蒸散系数等参数, 提出能够反映土壤、植物本身因素和气象条件综合影响的不同时段草原植被供需水满足程度的干旱指标, 并与水分亏缺造成的减产程度进行比较, 综合给出草原干旱等级指标, 以提高干旱指标的客观性和代表性。

1 资料来源和方法

1.1 资料来源和站点选择

选择巴雅尔胡硕、额尔古纳市气象站为草甸草原代表站点, 锡盟牧业气象试验站、镶黄旗和察右后旗气象站为典型草原代表站点, 孪井滩牧业气象试验站为荒漠草原代表站点, 利用近 20 a 的气象资料和牧草、土壤水分平行观测资料进行分析。不同草原区代表站点的主要自然、气候特征见表 1。牧草产量为地上部总生物量, 5—9 月每月测定一次, 土壤水分资料采用 4—9 月每旬测定值, 测深 0—50 cm。牧草需水量或耗水量采用水量平衡法, 参考作物蒸散量采用 Penman-Monteith 公式[13] 计算。

表 1 不同草原区主要气候、土壤特征 *

Tab. 1 The main characteristics of climate and soil in different steppe types

草原类型	$R_{年}$/mm	R_{4-9}/mm	$T_{年}$/℃	T_{4-9}/℃	$W_{有(0-50)}$/mm	γ_{0-50}/(g·m^{-3})	最高产量/(kg·hm^{-2})
草甸草原	405.7	371.9	0.35	12.2	120.2	1.28	3 182.8
典型草原	300.6	269.5	3.3	14.6	105.2	1.35	1 593.8
荒漠草原	143.5	130.2	8.6	19.4	79.7	1.62	2 61.6

注: R 表示降水, T 表示温度, $W_{有(0-50)}$ 和 γ_{0-50} 分别表示 0—50 cm 土层的最大有效含水量[14] 和平均容重。牧草产量一般以 8 月底测定的最高, 故用 8 月底测定的多年平均产量来衡量各地区草场生产力(因 9 月份牧草生长基本停滞, 凋落物增多收集困难, 测定结果常有降低现象)。

收稿日期: 2007-01-11; 改回日期: 2007-03-09
基金项目: 国家社会公益研究专项基金项目(2004DIB4J170)资助
作者简介: 侯琼(1960—), 女, 河北行唐人, 正研级高工, 主要从事干旱农业和草原生态研究。E-mail: qiong_hou@sina.com
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2　草原水分充分供给年的确定

降水是干旱、半干旱区天然草原植被水分的唯一来源。由于在水分的补给方面缺少人工干预，所以水分充分满足条件下的天然牧草生长和蒸散状况难以确定。根据已有的研究成果，牧草产量和降水量存在明显的正相关关系[15]，故选择生长季降水距平百分率大于 20%，且降水分布较均匀，8 月产量距平百分率大于 35%的年份，视为水分满足供给年，用来分析天然牧草需水量和最高产量。以典型草原为例，3 个站点的降水距平百分数和产量距平百分数的相关程度达到 0.001 的显著水平（$r=0.6516$，$n=43$），锡林浩特地区有 3 a（1993 年、1996 年和 1998 年），察右后旗有 2 a（1995 年、1998 年），镶黄旗有 1 a（1998 年）年降水量超过 350 mm，较常年偏多 20%～60%，这 6 个丰水年生长季的土壤平均相对湿度为 77.9%，比多年平均值高出 21.1%，逐旬测定值大多数超过 70%，产量偏多 35%～80%，各时期牧草长势良好，如图 1 和图 2 所示，故将这 6 年作为水分充分供给样本年。同理，确定出草甸草原（巴雅尔胡硕 1991 年、1992 年、1994 年和 1999 年，额尔古纳1996年）和荒漠草原（李井滩1994年、1997 年和 2002 年）的水分充分供给年。

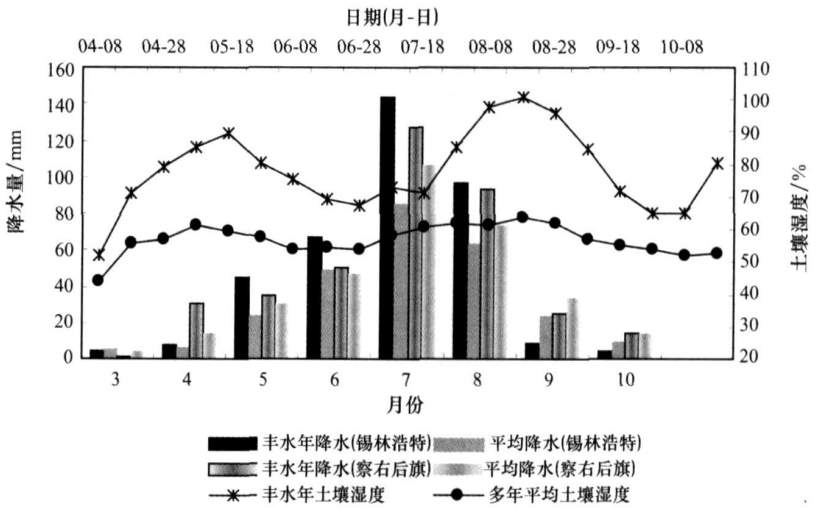

图 1　丰水年与多年平均降水量和土壤相对湿度的比较

Fig. 1　Comparison of precipitation and relative soil moisture between wet-year and the multi-year average

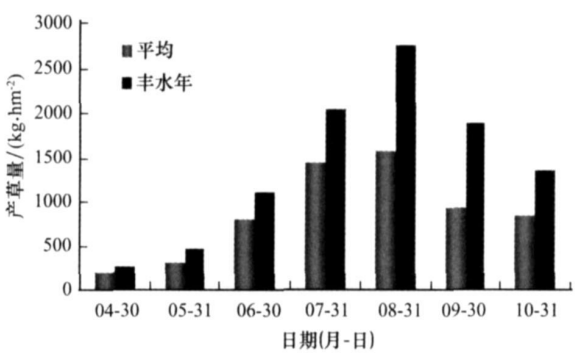

图 2　丰水年产草量与多年平均的比较

Fig. 2　Comparison of forage yield between wet-year and the multi-year average

1.3　减产率的计算

干旱对草原生态系统的影响通常体现为生物量的减少。利用水分亏缺程度判断草原旱情，不能直接反映出干旱对生物产量造成的影响。为了将水分亏缺程度与产量的减少幅度统一考虑，提出了减产率指标，根据不同水文年份的产草量与上述确定的充分供水年份的平均生物产量进行比较，计算出减产率 I，公式如下：

$$I_i = (y_i - Y_i)/Y_i \times 100\% \qquad (1)$$

式中：y_i 为不同水文年份草地生物学产量（$kg \cdot hm^{-2}$）；Y_i 为水分充足年份平均产量（$kg \cdot hm^{-2}$）。

2　草原旱情指数的计算

2.1　草原旱情指数的概念

为了综合反映草原供需水的满足程度，引入“草地旱情指数”这一指标。其内涵是：从土壤水分角度反映系统供水能力，从牧草正常生长所需要的水分确定系统的水分需求，从蒸散量的角度反映大气因子对水分散失的影响，以时段供水量对牧草同期需水量的满足程度，作为衡量旱情的标准。由于草原

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

干旱的发生比较缓慢，其强度是一个逐渐积累的过程，所以采用时段累积供水量和累积需水量作为参数，提出草地旱情指数，即：

$$K_i = \sum_{t=1}^{i} S_i \Big\backslash \sum_{t=1}^{i} E_{mi} \tag{2}$$

$$S_i = W_{i-1} + R_i - Et_i \tag{3}$$

$$Et_i = Kc \times Eto_i \tag{4}$$

式中：K_i为草地旱情指数；S_i为草地生长期 i 时段供水量(mm)；E_{mi}为生长期 i 时段需水量(mm)；W_{i-1}为时段初土壤水分储量(mm)；R_i为时段内降水量(mm)；Et_i为时段内耗水量(即实际蒸散量，mm)；Kc为草地蒸散系数(草地最大蒸散量与参考蒸散量之比)；Eto_i为参考作物蒸散量(mm)。草地实际蒸散量和需水量反映了土壤、植物和气象条件对草原生态系统的综合影响；K_i可较真实地反映牧草水分的亏缺情况。

2.2 参数的确定

2.2.1 需水量 E_{mi}的确定

以旬为时间尺度，利用水分满足供给年的平均降水量、土壤储水量等资料，计算植被最大耗水量，并作为草原植被需水量，建立需水量模拟方程。由于内蒙古草原区植被盖度较小，根系主要集中在0—50 cm 土层内，当日降水量超过 0—50 cm 土层的容水能力(降水量与时段土壤储水量之和大于田间有效储水量)时，多余的水分做径流、深层渗漏处理，由此可采用简化的水分平衡公式计算需水量，即：

$$E_{mi} = W_{i-1} - W_i + R_i - \lambda \tag{5}$$

式中：W_{i-1}和 W_i分别为前一旬和当旬的土壤储水量；R_i为当旬降水量；λ 为超出土壤容水能力的水分。利用(5)式和典型草原区 3 个站点 6 个丰水年生长季逐旬土壤水分和气象资料，计算出典型草原4—9 月各旬需水量和生长季总需水量在 317～371 mm 之间，平均为 351.5 mm，与前人得出的典型草原降水量≥350 mm 为丰收年的结论一致[16]。采用同样方法，利用巴雅尔胡硕、额尔古纳和孪井滩 3 个站点的丰水年资料，建立了草甸草原和荒漠草原的需水量时间变化方程式(表 2)，根据表中方程式计算出不同草原类型 4—9 月各时段的累计需水量(表3)，其反映出草原群落在一定环境下的消长的过程和生长特性。草甸草原与典型草原的生长季需水量相差 30 mm，主要表现在 7—9 月，各月均差 10 mm；荒漠草原的需水量明显低于前两种草原类型。在时间分布上，各类草原需水量以 7 月、8 月最多，6 月次之，说明该时段是牧草生长的水分关键期。

表 2 不同草原类型需水量时间变化经验方程

Tab. 2 Empirical equation of water consumption changing with time in different steppe types

草原类型	经验公式	R^2	n
草甸草原	$Em = 0.0096t^4 - 0.3983t^3 + 5.0537t^2 - 18.82t + 25.556$	0.8718	17
典型草原	$Em = -0.3547t^2 + 7.7012t - 11.375$	0.8076	18
荒漠草原	$Em = -0.1458t^2 + 3.182t - 2.2025$	0.8395	17

注：式中 Em 为需水量(mm)；t 为返青后牧草生长的旬数，返青期当旬 $t=1$，第二旬 $t=2$，依此类推。一般草甸草原、典型草原和荒漠草原返青期分别出现在 4 月下旬，4 月中旬和 4 月上旬。

表 3 不同草原类型各时段累计需水量和最佳产量

Tab. 3 Accumulative water consumption and optimal yield of different steppe types in growth period

草原类型	统计值	4 月	4—5 月	4—6 月	4—7 月	4—8 月	4—9 月
草甸草原	需水量/mm	15	60	120	250	350	390
	产量 Y/(kg·hm^{-2})		750	2 000～2 500	3 000～3 500	3 500～4 400	4 500
典型草原	需水量/mm	20	60	120	240	330	360
	产量 Y/(kg·hm^{-2})	200	700～1 000	1 100～1 600	1 600～2 100	1 800～2 500	2 100～2 600
荒漠草原	需水量/mm	5	30	70	110	150	180
	产量 Y/(kg·hm^{-2})		200	250	300	350	360

2.2.2 最佳产草量的确定

将计算需水量年的产草量作为最佳产量，建立相关模型。在水分不受限制状态下，牧草产量随需水量的增加呈对数形式增加。典型草原需水量在100 mm 以前，牧草产量随需水量增加迅速升高，100～300 mm 时产量增加趋于平缓，接近 400 mm 时产量增加基本停止(图 3)。利用图 3 中的回归方程模拟计算出各时段需水量所对应的最佳产量。因同一草原类型不同区域间环境条件存在一定差异，导致最佳生物量有一定的波动。根据内蒙不同草原类型中代表站点的实际情况给出了各草原类型最高产量的变化范围(见表 3)，在实际中视具体情况而定。同样方法得出草甸草原和荒漠草原的各时段最佳产量。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

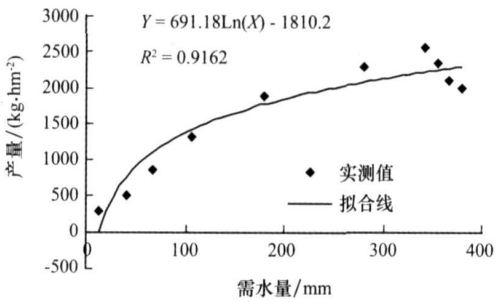

图 3　典型草原需水量与产量的关系

Fig. 3　Correlation between forage yield and water consumption of typical steppe

2.2.3　草地蒸散系数 Kc 的确定

蒸散系数是草地群落本身生物学特性的反应映，与群落结构、生育时期和生长状况有关，体现了草原的耗水能力。实际测定有一定难度，通常采用计算的方法，即：

$$Kc = E_{mi} / Eto \tag{6}$$

本文通过计算丰水年的实际最大蒸散量 E_{mi} 和参考作物蒸散量 Eto，比较后得出草地蒸散系数 Kc 值。它在表征气候季节性变化的同时，又可以反映草地植被的生长发育特点，特别是植被覆盖度的时间变化特点。对于同一草地类型而言，这种变化年际间虽有一定差异，但相对变化不大，可以把蒸散系数看成是时间的函数。实测资料表明，蒸散系数随时间的变化可以用多项式来进行描述（表 4）。利用经验方程计算出不同草原类型区生长季内各月的蒸散系数（表 5）。

表 4　不同草原类型蒸散系数经验方程式

Tab. 4　Empirical equation of evapotranspiration coefficient in different steppe types

草原类型	经验公式	R^2	n
草甸草原	$Kc=-0.001t^3+0.0115t^2+0.1062t-0.1896$	0.7162	17
典型草原	$Kc=-0.0012t^3+0.0265t^2-0.0825t+0.2166$	0.8658	18
荒漠草原	$Kc=-0.0004t^3+0.0061t^2+0.0236t-0.0092$	0.9230	17

注：表中 t 为返青后牧草生长的旬数，取值同表 2 注。

表 5　不同草原类型的蒸散系数

Tab. 5　Evapotranspiration coefficients of different steppe types

草原类型	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	4—9 月
草甸草原	0.15	0.50	0.88	1.02	0.89	0.28	0.62
典型草原	0.16	0.32	0.64	0.95	0.91	0.55	0.58
荒漠草原	0.08	0.23	0.38	0.47	0.43	0.20	0.30

2.2.4　供水量 S 的确定

土壤水是大气-植被-土壤-地下水系统的核心和纽带，担负系统的物能传输[17]。草原生态系统中水分的供给主要体现为土壤储水量的多少。因此，供水量 S 的计算中土壤有效水分储存量的确定是关键。土壤水分含量通过两种方法获取，一是实地测量，目前内蒙古地区有 91 个气象站开展土壤水分观测业务，而遥感测墒工作也在同步进行，可以利用实测资料（测深至少 50 cm）分区统计分析后作为供水量；另一种方法是通过计算得到，目前应用最多的是水量平衡法，可根据前述（3）式计算或用刘寿东等曾提出的干旱、半干旱草原区土壤水分的计算方法[18]得到。

3　干旱分级

利用公式（1）和（2）分别计算了 6 个站点 15 a 中 5—8 月各月的旱情指数 K_i 和减产率 I_i，通过统计分析两者的相关程度达到 0.001 的水平（$R=0.4529$，$n=351$），比较其间的差异，并参考草原旱灾历年出现的频率，划分出草原干旱等级。

一般情况下，当 $K>1$ 时，表示水分供大于求，有向涝发展的趋势或涝；当 $K=1$ 时，表示水分供需平衡；当 $K<1$ 时，表示水分供不应求，有向干旱发展的趋势或旱；以草地旱情指数计算结果为一级指标，减产率为二级指标，两者配合，按干旱的危害程度划分旱灾等级如表 6。

表 6　干旱划分等级表

Tab. 6　Grading of drought

指标	偏涝	正常	轻旱	中旱	重旱
干旱指标 K	$K\geqslant1$	$1>K\geqslant0.8$	$0.8>K\geqslant0.6$	$0.6>K\geqslant0.4$	$K<0.4$
减产率 I/%	—	$I<25\%$	$25\%<I\leqslant45\%$	$45\%<I\leqslant65\%$	$>65\%$

当 K 值大于 0.8 和 I 值小于 25%时不出现干旱现象，K 值在 0.8～0.4 之间，I 值在 25%～65%之间每隔 0.2 或 20%为一个级差，划分出 3 个等级。重旱是指供水量仅为草原群落正常生长需水的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

40%以下，水分亏缺严重，草地生物学产量与正常年份相比减产幅度达 65%以上，其他等级依此类推。

4 干旱指标的应用和检验

4.1 干旱指标的检验

为了检验干旱分级指标的合理性，以典型草原为例，利用 1990—2002 年不同时段的产量和耗水量资料，计算了 K 值和 I 值，以表 6 中 K 值划分等级为主导指标，I 值为对照进行校核，得出各地区不同时段各类干旱出现的频率（表 7）。表中反映出旱灾发生的时空规律，春季干旱发生频率高，程度大，中旱、大旱发生次数多，随着雨季的到来干旱发生频率和强度逐渐减小；在空间分布上，察右后旗干旱发生的频次少、强度小，锡林浩特、镶黄旗干旱发生频率高、程度重，与干旱发生的实际分布规律基本一致，表明指标有比较强的代表性。

表 7 各站点不同时段各级干旱出现频率

Tab. 7 Appearing frequency of drought grade in different period of every observation station

时段	4—5 月			4—6 月			4—7 月			4—8 月		
	锡盟	后旗	黄旗	锡盟	后旗	黄旗	锡盟	后旗	黄旗	锡盟	后旗	黄旗
正常/%	15	25	13	21	20	16	30	45	22	37	50	37
轻旱/%	35	33	30	31	50	37	40	36	39	44	42	40
中旱/%	27	25	37	24	20	32	20	9	24	10	8	13
大旱/%	23	17	20	18	10	15	10	9	15	9	0	10
中旱以上/%	50	42	57	42	30	47	30	18	39	19	8	23

4.2 干旱指标的应用

利用 2003 年、2004 年和 2005 年的土壤水分、气象资料对综合指标进行了检验，结果如表 8。分析表中数据得出，两个指标的一致性达到 75.3%，其中典型草原的最好，达到 80%，荒漠草原的次之为 73.3%，草甸草原的最差为 66.7%，其原因主要是草甸草原两个代表站点环境差异较大，在适宜产量选择上可能存在较大误差，造成干旱程度判断的不一致性。总体上，趋势基本一致，并与牧业气象报表描述的旱情相吻合。

造成 K 值和 I 值不一致的主要原因是：牧草产量并非只取决于降水，温度对春季牧草返青和产量，及水分条件较好地区产量的影响程度常常大于降水，鼠、虫灾害及其他气象灾害等也会对牧草产量造成一定影响。在未剔除温度等因素影响产量的前提下，使用减产率判断干旱程度可能会产生偏差，仅作

表 8 各地干旱指标（K 值）和减产率（I 值%）计算结果及干旱等级

Tab. 8 Regional drought index, yield reduction rate and drought grade in study area

草原类型	地点	年份	5 月		6 月		7 月		8 月		9 月	
			K	I	K	I	K	I	K	I	K	I
草甸草原	巴雅尔胡硕	2003	0.46**	−58**	0.63*	−31*	0.77*	6	0.74*	5	0.78*	—
		2005	0.59**	−53**	0.56**	−46**	0.68*	−16	0.83	2	0.89	3
	额尔古纳	2003	0.21***	−71***	0.65*	−26*	0.67*	−42*	0.73*	−31*	0.78*	−32*
		2004	0.73*	−56**	0.54**	−55**	0.64*	−44*	0.67*	−43*	0.66*	−53**
		2005	0.50**	−37*	0.61*	−19	0.76*	−13	0.78*	−28*	0.86	−21
典型草原	锡林浩特	2003	0.62*	−43*	0.96	−21	0.89	92	0.98	78	0.95	24
		2004	0.22***	−85***	0.34***	−75***	0.44**	−64**	0.68*	−32*	0.76*	−31*
		2005	0.41**	−46**	0.42**	−35*	0.38***	−44*	0.34***	−41*	0.35***	−43*
	镶黄旗	2003	0.90	−33*	0.75*	−10	0.82	−19	0.83	−21	0.93	—
		2004	0.70*	−34*	0.73*	−38*	0.61*	−18	0.65*	−10	0.76*	—
		2005	0.23***	−94***	0.16***	−77***	0.25***	−82***	0.36***	−84***	0.39***	—
	察右后旗	2003	0.68*	−36*	0.67*	−33*	0.65*	−32*	0.76*	−28*	0.89	—
		2004	1.20	−12	0.89	−12	0.92	−19	0.96	−28	0.99	—
		2005	0.44**	−64**	0.27***	−72***	0.32***	−76***	0.46**	−69***	0.54**	−50**
	鄂温克	2003	0.56**	−51**	0.46**	−46**	0.37***	−51**	0.55**	−46**	0.61*	−37*
		2004	1.2	−14	0.77*	−38*	0.68*	−37*	0.82	−24	0.82	−23
荒漠草原	李井滩	2003	1.3	−23	1.10	−5	0.75*	−46*	0.93	−44*	0.75*	−48**
		2004	0.79*	−22*	0.44**	−60**	0.48**	−61**	0.66*	−36*	0.65*	−32*
		2005	1.1	−16	0.52**	−70***	0.38***	−75***	0.40***	−77***	0.52**	−78***

注："*、**、***"分别表示轻旱、中旱和重旱。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为干旱评判的辅助指标考虑。

5 结语

内蒙古草原是一个缺水和环境脆弱的生态系统，干旱发生的频率和危害程度都十分严重，干旱研究是一个长久的课题，探讨确定使用范围广泛、生物学意义明确的草原干旱指标是干旱研究的重要环节。本文从SPAC 角度研究草原干旱指标，根据各生长时期的供需水关系建立干旱指标等级，并用减产率进行了校验，较准确地反映出草原的干旱程度。与农业干旱不同的是前期干旱对后期牧草产量造成影响的累加效应不强，草原阶段性干旱指标的指导意义比农业干旱强。尽管如此，仍存在一些问题，一是区域尺度上供水量的测定或计算方法仍未解决，以单站点或几个站点的结果代表整个区域，缺乏连续性，代表性也有待于提高；二是土壤水分的测定深度不够，计算模型中对下层水分的运动和径流考虑不足，影响估算精度；三是减产率的计算未考虑温度、鼠、虫灾害等非干旱因素造成的减产，影响评价效果。这些问题还需要在今后的工作中研究解决，文中提出的指标是否具有普适性和准确性还应在实践中验证。

参考文献（**References**）：

[1] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——3. 沙漠化研究和防治的重点区域[J]. 中国沙漠，2004，24(1)：1－9.

[2] 谢应齐. 关于干旱指标的研究[J]. 自然灾害学报，1993，2(2)：55－62.

[3] 王密侠，马成军，蔡焕杰. 农业干旱指标研究与进展[J]. 干旱地区农业研究，1998，16(3)：119－124.

[4] 王石立，娄秀荣，庄立伟. 相对蒸散在冬小麦干旱宏观评估中的应用[J]. 气象学报，1998，56(1)：104－111.

[5] 刘庚山，郭安红，安顺清，等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报，2004，13(4)：21－26.

[6] 徐启运，张强，张存杰，等. 中国干旱预警系统研究[J]. 中国沙漠，2005，25(5)：785－789.

[7] 王锡稳，王毅荣，张存杰. 黄土高原典型半干旱区水热变化及其土壤水分响应[J]. 中国沙漠，2007，27(1)：123－129.

[8] 郭克贞. 内蒙古草原干旱指标研究[J]. 内蒙古水利，1994(1)：14－19.

[9] 梁春成，梁云，陈洁，等. 天然草场牧草干旱指标探讨[J]. 中国农业气象，1999，20(3)：5－8.

[10] 余生虎. 高寒草甸土壤水分指标的探讨和干旱预报[J]. 青海气象，2000(3)：37－40.

[11] 刘昌明，于沪宁. 土壤-作物-大气系统水分运动实验研究[M]. 北京：气象出版社，1997：1－18.

[12] 付爱红，陈亚宁，李卫红，等. 干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展[J]. 中国沙漠，2005，25(5)：744－749.

[13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 1998, No. 56.

[14] 胡双熙，张建明，王建永. 我国半干旱地区土壤的特性与可持续发展[J]. 中国沙漠，2002，22(5)：476－482.

[15] 侯琼，梁秀婷. 内蒙古典型草原水分条件与天然牧草产量的关系[J]. 气象，2006，32(专刊)：116－120.

[16] 王英舜，杨文义，贺俊杰，等. 草原干旱对天然牧草生长发育及产量形成的影响[J]. 气象，2001，27(2)：12－15.

[17] 李锦秀，肖洪浪. 流域尺度土壤水研究进展[J]. 中国沙漠，2006，26(4)：536－542.

[18] 刘寿东，戴艳杰. 内蒙古草地土壤水分动态监测预测模式的研究[C]//沈建国主编. 信息技术与内蒙古气象减灾应用研究. 北京：气象出版社，2002：84－87.

Drought Index of Steppe in Inner Mongolia based on SPACC Principle

HOU Qiong[1], CHEN Shu-hua[2], Wulan Bater[2]

(1. *Institute of Inner Mongolia Meteorological Sciences, Hohhot* 010051, *China*; *Zoology and Agrometeorological Center of Inner Mongolia, Hohhot* 010051, *China*)

Abstract: According to data of soil water, grass biomass output and meteorological factors in recent 20 years, and by methods of contrasting analysis and water quantity balance, the empirical equations of water requirement and evapotranspiration rate changing with time in growth season of the meadow, the typical and the desert steppes were formulated in the paper. The water requirements of the meadow, the typical and the desert steppes were respectively 390 mm, 360 mm and 180 mm during the period from April to September, their corresponding evaportranspiration rates (Kc) were 0.62, 0.58 and 0.30. Based on the principle of SPAC, the calculating method of steppe drought index (K) was provided, which was combined with the reduction rate of grass yield (I) the drought grading index system was further put forward. Slight drought: $0.8 > K \geqslant 0.6$, $25\% < I \leqslant 45\%$; moderate drought: $0.6 > K \geqslant 0.4$, $45\% < I \leqslant 65\%$; Severe drought: $K < 0.4$, $I > 65\%$. The consistency of the index system reached 75.3% in three years test, and the drought description of this system was generally identical with that of the animal husbandry meteorological report.

Keywords: drought index; steppe; SPAC principle

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net