

# 微咸水灌溉下不同生物炭对盐碱土水盐运移的影响

郭祥林<sup>a</sup>, 高佩玲<sup>a,b\*</sup>, 吴畏<sup>a</sup>, 张雪<sup>a</sup>, 李孟钊<sup>a</sup>, 王世斌<sup>a</sup>

(山东理工大学 a.农业工程与食品科学学院; b.资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 【目的】合理利用黄河三角洲地区微咸水资源改良盐碱地。【方法】以黄河三角洲地区中度盐碱土为研究对象, 进行室内一维入渗试验, 探讨在微咸水灌溉基础上掺加小麦/玉米秸秆生物炭对盐碱土水盐运移和 pH 值的影响。试验共设置 10 个处理: CK (去离子水)、X1 (10 t/hm<sup>2</sup> 小麦秸秆生物炭)、X2 (20 t/hm<sup>2</sup> 小麦秸秆生物炭)、Y1 (10 t/hm<sup>2</sup> 玉米秸秆生物炭)、Y2 (20 t/hm<sup>2</sup> 玉米秸秆生物炭)、W (3 g/L 微咸水)、WX1、WX2、WY1、WY2。

【结果】微咸水灌溉条件下掺加生物炭提高了土壤入渗能力, 增加了土壤保水能力, 且掺加小麦秸秆生物炭的入渗性能与保水效果优于掺加玉米秸秆生物炭, 其中 WX1 处理效果最优; 微咸水灌溉条件下掺加生物炭有利于土壤盐分的淋洗, 含盐量较微咸水灌溉处理降低了 7.30%~10.44%, 且掺加小麦秸秆生物炭降盐效果优于掺加玉米秸秆生物炭, 其中 WX1 处理脱盐效果最优, 脱盐率达 53.74%; 微咸水灌溉条件下掺加生物炭增加了土壤 pH 值, 但与淡水灌溉无明显差异, 且经小麦秸秆生物炭处理的土壤 pH 值均低于玉米秸秆生物炭, 其中 WX2 处理效果最好。【结论】在 3 g/L 微咸水灌溉条件下, 添加 10 t/hm<sup>2</sup> 的小麦秸秆生物炭对黄河三角洲地区中度盐碱土改良效果较好。

**关键词:** 微咸水矿化度; 生物炭; 中度盐碱土; 水盐分布; pH 值

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022144

OSID:



郭祥林, 高佩玲, 吴畏, 等. 微咸水灌溉下不同生物炭对盐碱土水盐运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 98-105.

GUO Xianglin, GAO Peiling, WU Wei, et al. Impact of Biochar Amendment and Brackish Water Irrigation on Water and Salt Movement in Saline-alkaline Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 98-105.

## 0 引言

【研究意义】据联合国统计, 我国盐碱地总面积达 9 913 万 hm<sup>2</sup>, 占全国耕地面积 10%, 但利用率不足 20%<sup>[1]</sup>。土壤盐碱化会破坏土壤结构, 降低土地生产能力, 严重制约我国农业可持续发展<sup>[2]</sup>。此外, 我国淡水资源匮乏, 仅占世界淡水资源的 6%, 随着工业进程发展, 水资源供需矛盾不断加剧, 迫切需要开发利用非常规灌溉水资源, 确保我国农业可持续发展<sup>[3-4]</sup>。黄河三角洲地区地处渤海之滨, 地下微咸水储量高, 开发利用率低, 盐碱地面积广, 且呈现不断增加的趋势<sup>[5]</sup>, 严重制约当地农业发展。因此, 合理开发利用微咸水改良盐碱地对黄河三角洲地区农业可持续发展有重要意义。

【研究进展】近年来, 利用微咸水改良盐碱地已备受关注, 有研究表明微咸水灌溉可以节省大量的淡水资源<sup>[4]</sup>, 能有效缓解淡水资源分配不均的问题。刘小媛等<sup>[6]</sup>研究发现, 使用微咸水灌溉盐碱地, 可以增加土壤的入渗能力, 且随着微咸水矿化度增大, 土壤

入渗能力增强。Zhu 等<sup>[7-8]</sup>研究发现, 利用微咸水灌溉可以提高土壤上层含水率, 使用低矿化度的微咸水灌溉可以降低土壤含盐量, 且与淡水灌溉无较大差异。但有研究表明, 长期利用微咸水灌溉会增加土壤含盐量, 增加土壤次生盐渍化风险, 不利于作物生长<sup>[9]</sup>。探索科学的微咸水利用方法具有重要现实意义。生物炭因其丰富的孔隙结构, 施入土壤具有降低土壤体积质量, 保水压盐的作用<sup>[9-10]</sup>, 被广泛用于盐碱地改良。叶协峰等<sup>[11]</sup>对玉米秸秆、小麦秸秆生物炭进行了孔隙结构研究, 结果表明, 在 700 °C 下烧制的玉米秸秆生物炭的孔隙度和比表面积要优于小麦秸秆生物炭。黄明逸等<sup>[12-13]</sup>研究发现, 施加小麦秸秆生物炭可以促进咸淡轮灌对土壤盐分的淋洗, 提高脱盐率和脱盐深度, 增加了土壤含水率, 具有降盐保水的作用。Zhao 等<sup>[14]</sup>研究发现, 施加玉米秸秆生物炭可降低苏打盐碱地土壤的盐度和碱度, 提高土壤有机质量与作物产量。朱成立等<sup>[15]</sup>研究表明, 施加生物炭可以缓解微咸水灌溉条件下土壤积盐情况, 减轻作物受到盐胁迫的程度。

【切入点】目前关于微咸水和生物炭改良盐碱地研究多集中于微咸水灌溉或单施生物炭对盐碱地改良效果的研究, 缺乏微咸水与生物炭二者协同作用对盐碱地改良效果的研究, 且在微咸水灌溉条件下, 探究小麦/玉米秸秆生物炭对盐碱土改良效果的对比研究较少。探讨微咸水灌溉条件下施加小麦/玉米秸秆生物

收稿日期: 2022-03-20 修回日期: 2023-04-06 网络出版日期: 2023-05-17

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2020ME251)

作者简介: 郭祥林 (1998-), 男, 山东临沂人。硕士研究生, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: GXLI15689052117@163.com

通信作者: 高佩玲 (1973-), 女, 新疆石河子人。教授, 博士, 主要从事水文、水资源及农业水土研究。E-mail: gaoplj@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

炭对盐碱地协同改良效果,对黄河三角洲地区盐碱地改良和水土资源高效利用具有重大意义。黄河三角洲地区主要农作物为冬小麦/夏玉米,作物秸秆年产量大且利用率低下,同时秸秆焚烧会污染大气环境,合理利用小麦/玉米秸秆废弃物制成的生物炭进行盐碱地的改良,可实现该区农业的绿色发展和环境保护。

【拟解决的关键问题】本研究以黄河三角洲地区中度盐碱土为研究对象,通过室内一维垂直入渗试验,在 3 g/L 微咸水灌溉条件下,掺加小麦/玉米秸秆生物炭,研究微咸水灌溉条件下不同生物炭对中度盐碱土入渗特性、水盐分布规律和 pH 值的影响,并探讨其对盐碱地的协同改良效果,以期为黄河三角洲地区微咸水合理利用以及盐碱地的综合改良提供理论依据及数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用土于 2021 年 3 月取自东营市东营区六户

表 2 生物炭理化指标

Table 2 Particle distribution of the studied soil

生物炭种类	灰分/%	含碳量/%	pH 值	比表面积/(m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	EC <sub>5:1</sub> /(mS cm <sup>-1</sup> )	含盐量/(g L <sup>-1</sup> )
小麦秸秆生物炭	5.2	86	8.5	13	1.89	4.3
玉米秸秆生物炭	5.0	82	8.6	12	2.02	4.6

试验用水包括淡水与微咸水,淡水选用去离子水,微咸水的矿化度为 3 g/L。本试验的微咸水根据当地地下水盐分的组成在实验室配置而得,配水实测矿化度为 3.02 g/L,各化学试剂质量浓度为 NaHCO<sub>3</sub>(0.539 g/L)、NaSO<sub>4</sub>(0.497 g/L)、NaCl(0.554 g/L)、CaCl<sub>2</sub>(1.023 g/L)。

### 1.2 试验装置

试验装置分为供水装置和试验土柱,供水装置为有机玻璃制成外表带有刻度的马氏瓶,马氏瓶内径为 8 cm、高 50 cm;试验土柱内径 8 cm、高 90 cm,侧面 10 cm 以下每 5 cm 开有圆形取样小孔,便于入渗结束后取样测量土壤水、盐等参数。本研究灌水定额根据式(1)计算<sup>[16]</sup>,计算结果为 14.86 cm。

$$M=H(\theta_{\max}-\theta_0)\gamma, \quad (1)$$

式中:  $H$  为土壤计划湿润层深度,取 40 cm;  $\theta_{\max}$  为土壤计划湿润层允许最大含水率(一般取田间持水率),  $\theta_{\max}=26.62\%$ ;  $\theta_0$  为土壤计划湿润层初始含水率,取 1.00%;  $\gamma$  为土壤体积质量,  $\gamma=1.45 \text{ g/cm}^3$ 。

### 1.3 试验设计

在室内进行一维垂直入渗试验,探究微咸水灌溉条件下施加生物炭对盐碱地改良效果的影响,试验共设置 10 个处理 3 次重复: CK(去离子水)、W(3 g/L 微咸水)、X1(小麦秸秆生物炭 10 t/hm<sup>2</sup>)、X2(小麦秸秆生物炭 20 t/hm<sup>2</sup>)、Y1(玉米秸秆生物炭 10

镇中度盐碱耕地,采用五点交叉取样法,去除表层 5 cm 土壤,利用取土器取样。取土深度为 40 cm,每 20 cm 分层取扰动土与原状土,每层 3 个重复。原状土取回后,立即测定田间持水率和土壤体积质量。扰动土经自然风干并过筛(2 mm),混合均匀并测定土壤的理化性质,详见表 1;利用 Mastersizer3000 型激光粒度仪测定土壤颗粒组成,砂粒量 44.17%,粉粒量 52.31%,黏粒量 3.52%,依据国际制土壤质地分类标准对供试土壤质地进行划分,属于粉砂质壤土。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of the studied soil

土壤类型	土壤体积质量/(g cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/%	全盐量/(g kg <sup>-1</sup> )	风干含水率/%	EC <sub>5:1</sub> /(mS cm <sup>-1</sup> )
中度盐化土	1.45	26.62	2.65	1.00	1.162

试验用生物炭改良剂为玉米、小麦秸秆在 800 °C 下经 72 h 热解而成,小麦、玉米秸秆生物炭的理化指标见表 2。

t/hm<sup>2</sup>)、Y2(玉米秸秆生物炭 20 t/hm<sup>2</sup>)、WX1(3 g/L 微咸水+小麦秸秆生物炭 10 t/hm<sup>2</sup>)、WX2(3 g/L 微咸水+小麦秸秆生物炭 20 t/hm<sup>2</sup>)、WY1(3 g/L 微咸水+玉米秸秆生物炭 10 t/hm<sup>2</sup>)和 WY2(3 g/L 微咸水+玉米秸秆生物炭 20 t/hm<sup>2</sup>)。试验时各层装土均按体积质量 1.45 g/cm<sup>3</sup> 分 16 层装土,土柱装土 80 cm,0~20 cm 装填生物炭与扰动土的混合土样,20~80 cm 装填扰动土,每层之间充分打毛,保证入渗均匀。试验开始前设置 2 cm 定水头,土柱顶端放置滤纸减少灌水对土壤的冲击作用。

### 1.4 指标及测定方法

土壤含水率:用烘干法进行测定<sup>[9]</sup>,待测样品放入烘箱烘干、冷却至室温。

土壤含盐量:样品烘干冷却后研磨、过筛,制取水土比为 5:1 的土壤浸提液,利用 DDS-11A 型电导率仪测定土壤浸提液的电导率<sup>[8]</sup>。根据该地区土壤浸提液电导率与土壤含盐量的线性关系,将电导率转化为土壤含盐量,转换公式为:  $y=2.281 1EC_{5:1}-0.001 5$ 。式中,  $y$  为土壤含盐量(g/kg);  $EC_{5:1}$  为 25 °C 下土水比为 1:5 的浸提液电导率(mS/cm)。

pH 值:使用电子天平称取待测样品 6 g,放入离心管按照水土比 2.5:1 加入去离子水,离心后用 pH 计(上海梅特勒-托利多仪器有限公司)测定。

脱盐率( $r_a$ %) : 土壤中脱去盐分占土壤初始盐

分的百分比<sup>[5]</sup>。

脱盐区深度 ( $D_s/cm$ )：土壤含盐量低于土壤初始含盐量的土层深度。

脱盐深度系数 ( $f_{DS}$ )：脱盐区深度与入渗结束时土壤湿润锋运移深度的比值。

达标脱盐区深度 ( $D_{ss}/cm$ )：土壤含盐量低于 2 g/kg 的土壤深度<sup>[8]</sup>。

达标脱盐区深度系数 ( $f_{DSS}$ )：达标脱盐区深度与土壤湿润锋运移深度比值。

### 1.5 数据分析

用 Excel 2019 处理数据并绘制湿润锋运移深度、累积入渗量与时间的关系曲线，以及不同处理的水盐分布曲线。利用 Kostiakov 模型与 Philip 模型<sup>[11]</sup>对入渗过程进行模拟，对比并分析 2 种模型的适用性。式 (2)、式 (3) 为拟合模型。

Kostiakov 入渗模型为：

$$i(t) = Kt^{-\alpha}, \quad (2)$$

式中： $i(t)$ 为入渗速率 (cm/min)； $K$  为入渗系数 (cm/min)； $\alpha$  为入渗指数； $t$  为入渗时间 (min)。

Philip 入渗模型为

$$i(t) = 1/2St^{0.5} + A, \quad (3)$$

式中： $i(t)$ 为入渗速率 (cm/min)； $S$  为土壤吸湿率 (cm/min<sup>0.5</sup>)； $t$  为入渗时间(min)； $A$  为稳渗率(cm/min)。

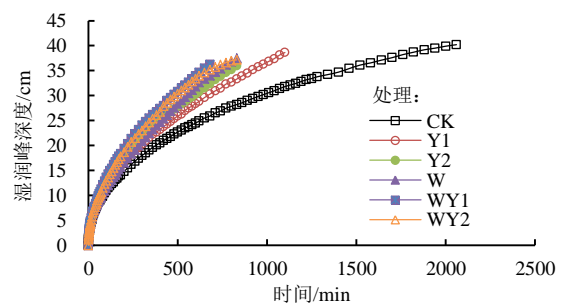
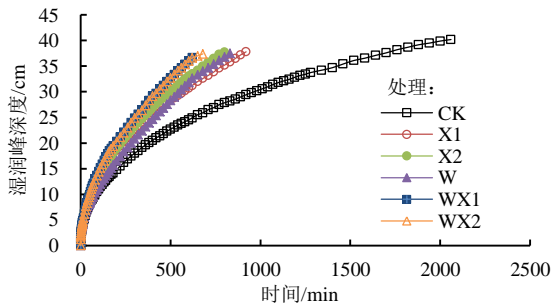


图 1 微咸水灌溉与生物炭施加下湿润锋运移深度随时间的变化曲线

Fig.1 Wetting front depth versus time curves under brackish water irrigation and biochar application

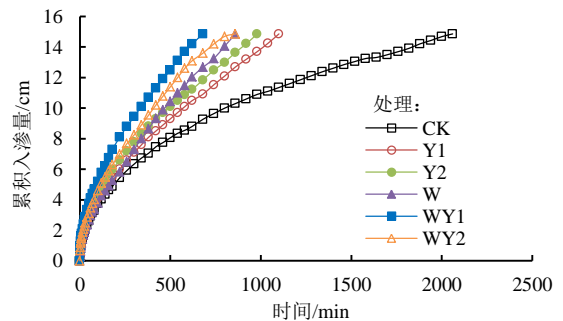
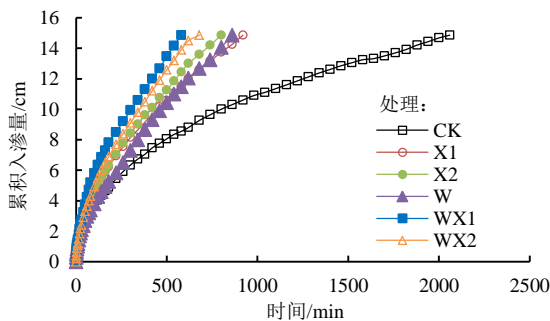


图 2 微咸水灌溉与生物炭施加下累积入渗量随时间的变化曲线

Fig.2 Cumulative infiltration versus time curves under brackish water irrigation and biochar application

Philip 模型与 Kostiakov 模型对入渗速率的拟合结果如表 3 所示，2 种模型均能较好的模拟各处理入渗速率与入渗时间之间的关系，拟合决定系数  $R^2$  均

## 2 结果与分析

### 2.1 微咸水与生物炭协同作用对土壤入渗性能的影响

图 1、图 2 是微咸水灌溉与生物炭施加下湿润锋运移深度和累积入渗量随时间变化曲线，从图 2 可知，各处理累积入渗量与湿润锋运移深度随着时间推移均呈增加趋势。相同入渗时间下，各处理累积入渗量与湿润锋运移深度均表现为 WX1 处理>WY1 处理>WX2 处理>WY2 处理>X2 处理>W 处理>Y2 处理>X1 处理>Y1 处理>CK；入渗完成时，各处理土壤湿润锋运移深度均变浅，其原因可能是微咸水与生物炭提升了土壤容水性能，增加了土壤的保水能力<sup>[8,17]</sup>。与 CK 相比，微咸水处理的入渗完成历时减少 58.25%，单施生物炭处理的入渗完成历时减少 41.7%~61.9%，这表明微咸水灌溉与单施生物炭均能提高土壤入渗能力；微咸水灌溉条件下掺加生物炭入渗完成时间均小于微咸水灌溉与单施生物炭处理，且在施加等量生物炭条件下，掺加小麦秸秆生物炭入渗完成时间均少于掺加玉米秸秆生物炭。综上所述，微咸水灌溉与掺加生物炭均增加了土壤的入渗能力，在微咸水灌溉条件下掺加生物炭对土壤入渗能力提升更为显著，且掺加小麦秸秆生物炭入渗能力优于玉米秸秆生物炭，其中 WX1 处理增幅最大。

在 0.93 以上，Philip 模型的拟合参数中稳定入渗率  $A$  出现负值，与实际不符，因此需要进一步优化，故 Kostiakov 模型能更精确描述各处理的入渗率与时间

的关系；Kostiakov 模型中的  $\alpha$  值反映了入渗率的衰减速度，其值越小，入渗速率衰减越慢；微咸水配施生物炭处理  $\alpha$  值均低于 CK，说明微咸水灌溉条件掺加生物炭可使入渗率的衰减变慢，其中 WX1 处理衰减幅度最小。

## 2.2 微咸水与生物炭协同作用对土壤水分垂直分布的影响

土壤水分是种子萌发和作物生长的必要条件，是土壤发生化学、物理和生物过程不可缺少的介质，各处理不同土层的含水率如图 3 所示。

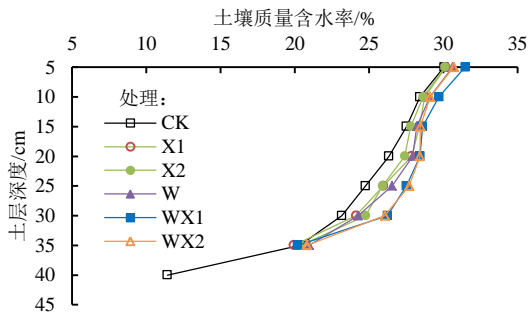


表 3 2 种入渗模型的拟合参数

Table 3 Fitting parameters for the two infiltration models

处理	Philip 模型			Kostiakov 模型		
	S	A	R <sup>2</sup>	K	$\alpha$	R <sup>2</sup>
CK	0.392 9	-0.002 5	0.977 2	0.275 7	0.589 2	0.970 0
X1	0.395 3	0.002 2	0.986 2	0.229 5	0.482 0	0.981 7
X2	0.413 4	0.003 8	0.964 5	0.220 2	0.453 7	0.965 6
Y1	0.436 9	-0.001 6	0.924 1	0.233 5	0.498 9	0.969 5
Y2	0.367 8	0.003 9	0.973 5	0.255 4	0.506 0	0.981 0
W	0.352 6	0.004 0	0.903 8	0.200 4	0.452 8	0.940 5
WX1	0.466 4	0.005 5	0.935 4	0.242 7	0.434 4	0.965 0
WX2	0.350 6	0.010 4	0.929 9	0.233 1	0.447 6	0.941 3
WY1	0.494 0	-0.000 7	0.951 2	0.225 9	0.443 1	0.978 3
WY2	0.354 0	0.004 8	0.945 6	0.197 9	0.448 2	0.935 0

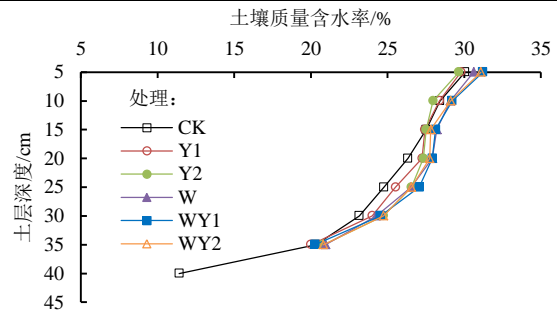


图 3 不同处理各土层土壤含水率

Fig.3 Relationship between soil moisture content in different soil layers treated with different treated

由图 3 可知，各处理土壤含水率随着土层深度增加呈降低趋势。在 0~40 cm 土层，各处理土壤含水率表现为 WX1 处理>WX2 处理>WY1 处理>WY2 处理>W 处理>X1 处理>X2 处理>Y2 处理>Y1 处理>CK。微咸水灌溉处理土壤含水率较 CK 提升了 3.9%，说明微咸水灌溉增加了土壤含水率；与 CK 相比，单施生物炭均增加了土壤含水率，其原因可能是生物炭自身带有的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子与盐碱土壤胶体吸附的  $\text{Na}^+$  发生交换，增加了土壤胶体的絮凝作用，促进了土壤团聚体的形成，进而增加了土壤的保水能力<sup>[15,18]</sup>；微咸水灌溉条件下掺加生物炭土壤含水率均高于微咸水灌溉处理和单施生物炭处理，且在相同生物炭施加量条件下，掺加小麦秸秆生物炭含水率均高于掺加玉米秸秆生物炭。综上所述，微咸水灌溉与单施生物炭处理均增加了土壤含水率，而采用微咸水配施生物炭处理更能有效提升土壤的保水能力，微咸水灌溉条件下，掺加小麦秸秆生物炭处理保水效果优于掺加玉米

秸秆生物炭，其中，WX1 处理的保水效果最好，土壤含水率较 CK 增加了 6.42%。

## 2.3 微咸水灌溉与生物炭协同作用对土壤盐分的影响

不同处理的各土层土壤盐分分布情况如图 4 所示。由图 4 可知，在 0~35 cm 土层，土壤含盐量整体表现为微咸水灌溉处理>微咸水配施生物炭处理>生物炭处理>CK。掺加生物炭处理土壤含盐量均高于 CK，且随着生物炭施加量增加土壤含盐量变大；采用微咸水灌溉增加了土壤含盐量，其原因可能为：微咸水中的盐分在土壤中累积，增大了土壤含盐量；与 CK 相比，微咸水配施生物炭处理增加了土壤含盐量，但土壤含盐量均低于初始含盐量，在微咸水灌溉条件下，掺加生物炭处理含盐量均低于未掺加生物炭处理，且在生物炭施用量一定时，掺加小麦秸秆生物炭土壤含盐量低于掺加玉米秸秆生物炭；在 35~40 cm 土层，各处理土壤含盐量发生突变，并在湿润锋处达到最大值。

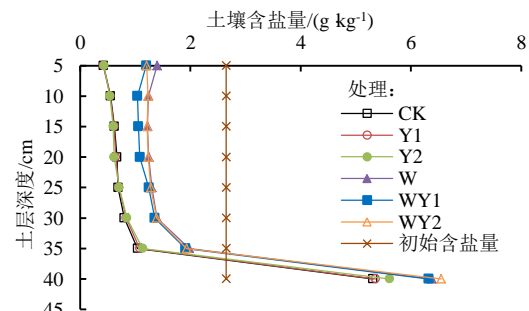
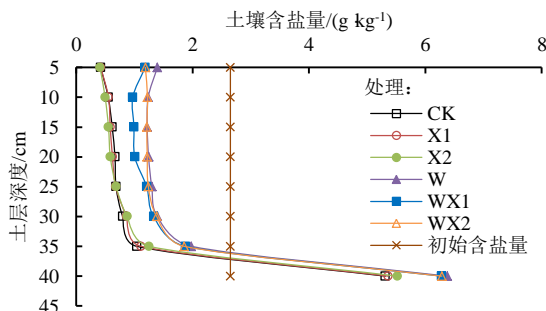


图 4 不同处理各土层土壤含盐量再分布特征

Fig.4 Redistribution characteristics of soil salinity in different soil layers



为了进一步研究土壤盐分垂直再分布特征,引入脱盐率平均值、脱盐区深度、脱盐区深度系数等指标对脱盐效果做进一步评价。表4为不同处理土壤盐分分布指标对比分析,本研究计算达标脱盐深度指标的土壤含盐量选用小麦苗期最低耐盐值(2 g/kg)<sup>[19]</sup>。

表4 不同处理土壤含盐量分布指标对比分析

Table 4 Comparative analysis on evaluation index of salinity distribution among different treatment

处理	$r_a/\%$	$D_s/\text{cm}$	$f_{DS}$	$D_{SS}/\text{cm}$	$f_{DSS}$
CK	74.22a	36.88a	0.917 5	36.12a	0.898
X1	73.92b	36.81b	0.973 7	36.04ab	0.953
X2	73.77c	36.64c	0.970 5	35.87b	0.950
Y1	73.96b	36.83b	0.953 5	36.07ab	0.934
Y2	73.73c	36.69c	0.985 0	35.96ab	0.965
W	47.36f	35.7e	0.953 6	35.03d	0.933
WX1	53.74d	35.89d	0.978 0	35.16c	0.958
WX2	49.81e	35.87d	0.959 0	35.13c	0.939
WY1	52.45d	35.83d	0.981 0	35.1c	0.962
WY2	49.43e	35.77e	0.963 1	35.07cd	0.944

由表4可知,入渗结束后,各处理均具有良好的脱盐效果,各处理脱盐深度、达标脱盐深度均可达到35 cm以上,可以有效降低小麦作物主根区(0~30 cm)含盐量;与CK相比,微咸水灌溉与掺加生物炭处理均降低了各项脱盐指标,在微咸水灌溉条件下,掺加生物炭处理脱盐率平均值、脱盐深度、达标脱盐深度、脱盐深度系数和达标脱盐系数均高于未掺加生物炭

处理,其中WX1处理的脱盐率、脱盐深度均高于其余处理。综合图4与表4可得,微咸水灌溉条件下,掺加生物炭增加了0~35 cm土层含盐量,但含盐量未达到作物耐盐阈值,且掺加小麦秸秆生物炭脱盐效果优于掺加玉米秸秆生物炭,其中WX1处理脱盐效果较好,脱盐率为53.74%。

#### 2.4 微咸水与生物炭协同作用对土壤pH值的影响

图5为各处理不同深度土层土壤pH值变化,由图5可知,随着土层深度增加各处理pH值均呈先增大后减小趋势。在计划湿润区内,0~20 cm土层,微咸水灌溉与单施生物炭处理均增加了土壤pH值,在微咸水灌溉条件下掺加生物炭土壤pH值均高于未掺加生物炭处理,这可能是由于生物炭自身具有的碱化特征,进一步增加了土壤pH值<sup>[20]</sup>。20~40 cm土层,各处理对土壤pH值的影响逐渐减弱,逐渐接近土壤初始pH值。从整个土层土壤平均pH值分析,除Y2处理,其余处理土壤平均pH值均略高于CK。与W处理相比,微咸水配施生物炭处理提高了土壤平均pH值,但各处理间无显著性差异( $P<0.05$ )。在施加等量生物炭条件下,微咸水配施小麦秸秆生物炭的pH值均低于配施玉米秸秆生物炭,其中WX2处理的土壤pH值小于其余配施处理,WX1处理与WX2处理差异较小。

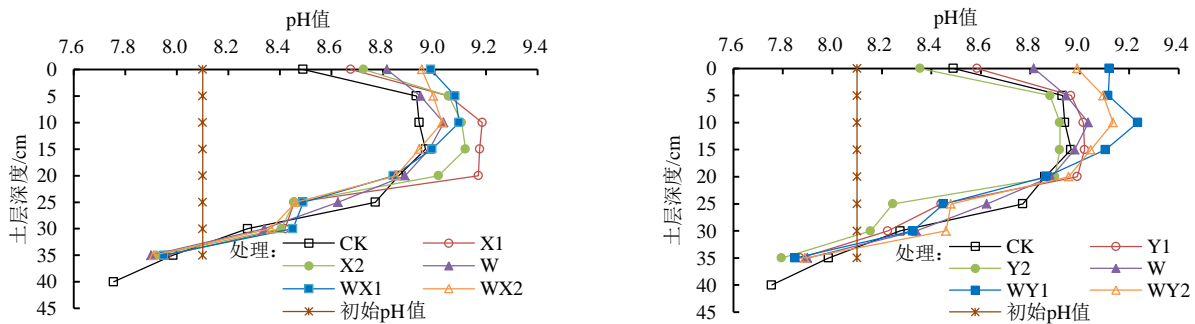


图5 不同处理的各土层土壤pH值

Fig.5 Soil pH values of different soil layers among different treatment

### 3 讨论

黄河三角洲地区盐碱地面积46.57万 $\text{hm}^2$ ,占全省盐碱地面积78%。土地盐碱化会导致土壤板结,改变土壤物理结构,影响土壤水分入渗过程<sup>[2,20]</sup>。土壤入渗能力是评价土壤水分调节能力的重要指标。本试验中,微咸水灌溉增加了单位时间内土壤湿润锋运移深度、土壤累积入渗量,提高了土壤入渗能力。原因可能为微咸水灌溉增加了土壤盐分浓度,扩散双电子层向黏粒表面压缩,降低了土壤颗粒间黏性,进而增加了土壤胶体的絮凝作用,从而增加了土壤的导水能力。在微咸水灌溉条件下,掺加生物炭进一步提升了土壤入渗性能,其中,WX1处理的土壤入渗能力明

显高于其他处理,其原因可能为生物炭具有吸附性,增加了土壤团聚体的个数,改善土壤结构进一步增加了土壤的导水性能<sup>[11]</sup>,这与刘淼等<sup>[10]</sup>研究结论基本一致。在相同生物炭施加量条件下,掺加小麦秸秆生物炭土壤入渗能力优于掺加玉米秸秆生物炭,其原因可能为小麦和玉米秸秆烧制成的生物炭的孔隙度和表面积等物理化学性质不同,施入土壤后,小麦秸秆生物炭更能促进土壤团聚体的形成,进而导致掺加小麦秸秆生物炭土壤入渗能力优于掺加玉米秸秆生物炭<sup>[21]</sup>。采用Philip、Kostiakov模型对土壤水分入渗过程进行模拟,结果表明,Kostiakov模型能够更真实的描述微咸水与生物炭协同作用对盐碱土的土壤水分入渗过程,在模拟微咸水灌溉配施生物炭改良黄

河三角洲地区中度盐碱土过程中适应性更强。

土壤中水盐量对作物生长具有重要作用，也是评价盐碱地改良的重要指标。本研究表明采用微咸水灌溉增加了土壤的含水率，其原因可能为微咸水改变了土壤的结构，增加了土壤的保水性，这与王世斌等<sup>[8]</sup>研究结果一致。在微咸水灌溉条件下掺加生物炭进一步增加了土壤保水能力，且掺加小麦秸秆生物炭的土壤保水能力优于掺加玉米秸秆生物炭，其中 WX1 处理的土壤含水率最大。这可能与生物炭自身的微孔结构和吸附能力有关，掺加生物炭可以增加土壤对水分的吸附作用，进而增加了土壤含水率<sup>[12]</sup>。土壤盐分超过作物耐盐阈值会影响作物正常生长，因此有效降低土壤中的盐分，减轻土壤盐胁迫对作物生长发育的影响，是盐碱土改良的重要目的。本试验研究表明，采用微咸水灌溉增加了土壤盐分，这与郭全恩等<sup>[22]</sup>使用微咸水灌溉提高土壤盐分，增加土壤次生盐渍化风险的结论一致，这是由于微咸水自身带有盐分，盐分随着土壤的入渗过程在土壤累积，导致土壤盐分增加<sup>[23]</sup>。本研究添加一定量的生物炭提高了微咸水灌溉条件下土壤盐分的淋洗程度，降低了土壤含盐量，增加了土壤脱盐率、脱盐深度，达标脱盐深度。配施生物炭处理的脱盐区深度、达标脱盐区深度均大于盐碱地区小麦根系主要集中区（0~30 cm），能够保证盐碱地区小麦根系的正常生长，且掺加小麦秸秆生物炭的脱盐效果优于掺加玉米秸秆生物炭，其中 WX1 处理脱盐效果最好。其原因可能为生物炭改善了土壤结构增加了土壤的入渗能力，进而增加了对土壤盐分的淋洗程度<sup>[24]</sup>。

在微咸水入渗土层深度内，微咸水灌溉下掺加生物炭处理土壤 pH 值呈先增加后降低的趋势，最终降低至土壤初始 pH 值附近。其原因为 0~20 cm 土层为生物炭添加层，生物炭增加了土壤 pH 值，在 20~40 cm 生物炭对土壤 pH 值影响逐渐减弱。微咸水灌溉下掺加生物炭处理的土壤平均 pH 值均高于未掺加生物炭处理，且各处理间无显著性差异。这说明掺加生物炭增加了土壤 pH 值，这与赵海成等<sup>[23]</sup>研究结果不一致，其原因可能为试验用土不同以及试验采用的生物炭的 pH 值不同，进而导致不同的试验结果。

综上所述，微咸水灌溉条件下掺加生物炭，增加了盐碱土的入渗性能、土壤含水率，降低了土壤含盐量，具有较好脱盐效果，有利于黄河三角洲地区微咸水和盐碱地的开发与利用。在 3 g/L 微咸水灌溉条件下，掺加 10 t/hm<sup>2</sup> 小麦秸秆生物炭对黄河三角洲地区中度盐碱土改良效果最优。本研究针对 3 g/L 微咸水灌溉条件下掺加小麦/玉米秸秆生物炭对黄河三角洲地区中度盐碱土改良效果进行了一系列研究，但施加

小麦/玉米秸秆生物炭对盐碱土水盐运移影响机理仍需进一步研究完善。

## 4 结论

1) 微咸水灌溉条件下掺加生物炭增加了土壤入渗能力，且掺加小麦秸秆生物炭入渗性能优于掺加玉米秸秆生物炭，其中，WX1 处理的效果最优，入渗时间较 CK 节省 69.9%；入渗模型拟合结果表明，Kostiakov 模型能够更精确模拟微咸水与生物炭协同作用下盐碱土的土壤水分入渗过程。

2) 微咸水灌溉下施加生物炭处理土壤含水率均高于未掺加生物炭处理，且在微咸水灌溉条件下掺加小麦秸秆生物炭保水效果优于掺加玉米秸秆生物炭，其中 WX1 处理效果最好，土壤含水率较 CK 增加了 6.42%。

3) 微咸水灌溉条件下，施加生物炭降低了土壤含盐量，且掺加小麦秸秆生物炭脱盐效果优于掺加玉米秸秆生物炭，其中 WX1 处理脱盐效果优于其余配施处理。

4) 微咸水灌溉条件下施加生物炭增加了土壤 pH 值，且各处理间无显著性差异。

5) 在 3 g/L 微咸水灌溉条件下掺加 10 t/hm<sup>2</sup> 小麦秸秆生物炭更有利于黄河三角洲地区中度盐碱土的改良。

（作者声明本文无实际或潜在的利益冲突）

## 参考文献：

- [1] SHRIVASTAVA P, KUMAR R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(2): 123-131.
- [2] HE K, HE G, WANG C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes Miscanthus growth in a coastal saline-alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103-107.
- [3] BAGGIO G, QADIR M, SMAKHITIN V. Freshwater availability status across countries for human and ecosystem needs[J]. Science of the Total Environment, 2021, 792: 148-230.
- [4] 王海霞, 徐征和, 庞桂斌, 等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 291-297.  
WANG Haixia, XU Zhenghe, PANG Guibin, et al. Effects of brackish water irrigation on water-salt distribution and winter wheat growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 291-297.
- [5] 刘月, 李孟钊, 徐志杰, 等. 不同改良方法对盐碱土壤水盐运移效果的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 183-191.  
LIU Yue, LI Mengzhao, XU Zhijie, et al. Effects of different improvers on water and salt migration in saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 183-191.
- [6] 刘小媛, 高佩玲, 张晴雯, 等. 微咸水矿化度对重度盐碱土壤入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 102-107.  
LIU Xiaoyuan, GAO Peiling, ZHANG Qingwei, et al. Effect of mineralization degree of infiltration water on infiltration characteristics of severely saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 102-107.

- [7] ZHU, YANG, SUN, et al. Response of water-salt migration to brackish water irrigation with different irrigation intervals and sequences[J]. *Water*, 2019, 11(10): 2 089.
- [8] 王世斌, 高佩玲, 赵亚东, 等. 微咸水对生物炭作用下盐碱土水盐运移特征的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(2): 181-187.  
WANG Shibin, GAO Peiling, ZHAO Yadong, et al. Effects of mineralization of brackish water on water-salt transport characteristics of saline-alkali soil supplemented with biochar[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(2): 181-187.
- [9] CUI Q, XIA J B, YANG H J, et al. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143 801.
- [10] 刘淼, 王志春, 杨福, 等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 1-8.  
LIU Miao, WANG Zhichun, YANG Fu, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 1-8.
- [11] 叶协锋, 于晓娜, 周涵君, 等. 不同秸秆生物炭的孔隙结构及其差异[J]. *生物质化学工程*, 2019, 53(2): 41-46.  
YE Xiefeng, YU Xiaona, ZHOU Hanjun, et al. Pore structure and fractal characteristics of biochars from different straw[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2019, 53(2): 41-46.
- [12] 黄明逸, 张展羽, 徐辉, 等. 咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(1): 238-247.  
HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, XU Hui, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(1): 238-247.
- [13] AMINI S, GHADIRI H, CHEN C R, et al. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: A review[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 939-953.
- [14] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137 428.
- [15] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 226-234.  
ZHU Chengli, LYU Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 226-234.
- [16] 刘小媛, 张晴雯, 高佩玲, 等. 间歇组合灌溉对中度盐化土壤水盐运移规律的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 1-6, 12.  
LIU Xiaoyuan, ZHANG Qingwen, GAO Peiling, et al. Effects of alteration irrigation on soil water and salt transport in moderately saline soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 1-6, 12.
- [17] HUANG M Y, ZHANG Z Y, ZHU C L, et al. Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 250: 405-413.
- [18] FEI Y H, SHE D L, GAO L, et al. Micro-CT assessment on the soil structure and hydraulic characteristics of saline/sodic soils subjected to short-term amendment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 193: 59-70.
- [19] 魏永霞, 王鹤, 刘慧, 等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 290-299.  
WEI Yongxia, WANG He, LIU Hui, et al. Effect of biochar on soil moisture and its infiltration performance in black soil area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 290-299.
- [20] 曹雨桐, 余冬立. 施用生物炭和聚丙烯酰胺对海涂围垦区盐碱土水力性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3 684-3 690.  
CAO Yutong, SHE Dongli. Effects of biochar and PAM application on saline soil hydraulic properties of coastal reclamation region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3 684-3 690.
- [21] 张瑞钢, 钱家忠, 陈钰辉, 等. 玉米和小麦秸秆生物炭对土壤重金属污染修复实验研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(3): 347-355.  
ZHANG Ruigang, QIAN Jiazhong, CHEN Yuhui, et al. Experimental study on remediation effect of maize and wheat biochar on heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(3): 347-355.
- [22] 郭全恩, 南雨丽, 李保国, 等. 灌溉水盐分组成对土壤水盐迁移参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23): 123-128.  
GUO Quanen, NAN Lili, LI Baoguo, et al. Effect of salt ion composition of irrigation water on parameters of soil water and salt movement[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 123-128.
- [23] 赵海成, 郑桂萍, 靳明峰, 等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 1 836-1 844.  
ZHAO Haicheng, ZHENG Guiping, JIN Mingfeng, et al. Effects of successive straw and biochar residue incorporation on physical and chemical characters of saline alkali soil and rice yield[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(9): 1 836-1 844.
- [24] 黄明逸, 张展羽, 翟亚明, 等. 咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 88-96.  
HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, ZHAI Yaming, et al. Effects of biochar on coastal saline soil and maize yield under alternate irrigation with brackish and freshwater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(21): 88-96.

## Impact of Biochar Amendment and Brackish Water Irrigation on Water and Salt Movement in Saline-alkaline Soil

GUO Xianglin<sup>a</sup>, GAO Peiling<sup>a,b\*</sup>, WU Wei<sup>a</sup>, ZHANG Xue<sup>a</sup>, LI Mengzhao<sup>a</sup>, WANG Shibin<sup>a</sup>

(a. School of Agricultural Engineering and Food Science; b. School of Resources and Environmental Engineering,

Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract: 【Objective】** Biochar amendment has been widely used to improve soil quality and remediate soil contamination. The objective of this paper is to elucidate the impact of its combination with brackish water irrigation on water flow and salt transport in saline-alkaline soils in the Yellow River Delta. **【Method】** The experiment was conducted using soil columns. Soil taken from the delta was amended with biochar of wheat or maize straw respectively. There were 10 treatments by applying 10 t/hm<sup>2</sup> (X1) and 20 t/hm<sup>2</sup> (X2) of wheat biochar (X1), or 10

t/hm<sup>2</sup> (Y1) and 20 t/hm<sup>2</sup> (Y2) of maize biochar. The control was irrigation with deionized water (CK). The concentration of the brackish water was 3 g/L. In each treatment, we measured the movement of water, salt and soil pH. **【Result】** Amending soil with biochar combined with brackish water irrigation improved soil infiltration capacity and water retention in the soil. The wheat straw biochar worked better in improving infiltration than the maize straw biochar. Biochar amendment combined with brackish water irrigation also facilitated salt leaching, reducing salt content in the soil by 7.3% to 10.44%, compared to the CK. Wheat straw biochar worked better in de-salinizing the soil than maize straw biochar, especially the X1 whose desalination rate was 53.74%. The addition of biochar combined with brackish water irrigation increased soil pH, albeit not significantly, especially the maize straw biochar in X2 which affects soil pH most. **【Conclusion】** Amending the soil with 10 t/hm<sup>2</sup> of wheat straw biochar combined with brackish water irrigation was effective to improve the quality of the saline soils in the Yellow River Delta region. Results of this study provide guidance to sustainably utilize brackish water and biochar to improve productivity of the saline-alkaline soils in Yellow River delta and areas with similar conditions.

**Key words:** brackish water mineralisation; biochar; moderately saline soils; water-salt distribution; pH

责任编辑：赵宇龙

(上接第 89 页)

## Using Vegetation Health Index to Calculate Spatiotemporal Variation in Drought and Its Determinants in Inner Mongolia

YIN Hang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zezhong<sup>3</sup>, ZHANG Weijie<sup>1,2</sup>, LAI Hexin<sup>3\*</sup>, WANG Fei<sup>3</sup>

(1. Institute of Water Resources of Pastoral Area, Hohhot 010018, China; 2. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract: 【Objective】** Drought is the most important abiotic stress affecting crop production in North China. Understanding its characteristics is essential to agricultural management. This paper is to investigate the spatiotemporal variation in drought from 1982 to 2020 and its underlying determinants in Inner Mongolia. **【Method】** The vegetation health index (*VHI*) measured from 1982 to 2020 was used to analyze the temporal and spatial characteristics of the drought. The cross-wavelet method was used to elucidate the effects of El Niño-Southern Oscillation (*ENSO*), Arctic Oscillation (*AO*), and sunspots on the drought. **【Result】** Drought in the studied region varied intra-annually, with the most severe droughts occurring in the summer. The main drought period is 8 years and 12 years. The central-northern region in Inner Mongolia experienced more severe droughts than other regions. Drought was more severe in the middle and northeast, while the south had seen a relief in drought. The region had witnessed a total eleven droughts in the studied period, with the most severe droughts occurring from October 1989 to March 1990. The worst and least severe droughts were in the 1980s and 2010s, respectively. Atmospheric circulation and sunspots correlated with the drought, with *ENSO* having the greatest influence and sunspots having the least impact on drought. **【Conclusion】** From 1982 to 2020, drought in Inner Mongolia had been worsening. *ENSO* influences drought most. These findings improve our understanding of the reasons behind the droughts and can help improve effective drought management in Inner Mongolia.

**Key words:** drought; vegetation health index; spatial-temporal evolution; driving force analysis; Inner Mongolia

责任编辑：白芳芳