

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20063

中国西北地区次生盐碱水无机氮转化与环境因子的相关关系

庄亚润^{1,2}, 孙真¹, 周凯¹, 朱兴龙³, 高宝德³, 高鹏程¹, 来琦芳¹

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
2. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
3. 甘肃省白银市景泰县渔业技术推广中心, 甘肃 白银 730400

摘要: 中国西北地区次生盐碱水中 NO_2^- -N 长期处于较高浓度, 严重制约了盐碱水养殖产业的可持续发展。根据对甘肃省景泰县草窝滩渔农综合示范区($104^{\circ}7'40''\text{E}$, $37^{\circ}19'6''\text{N}$)的定期定点监测, 运用配对样本 t 检验、Duncan's 多重比较和 Pearson 相关性分析, 研究了不同类型次生盐碱水体无机氮转化及其与环境因子的相关关系。结果表明: (1) 次生盐碱水无机三态氮(NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N)及总氮(TN)本底值高, 全年均值分别是 NO_2^- -N (0.3 ± 0.2) mg/L、 NH_4^+ -N (1.93 ± 1.25) mg/L、 NO_3^- -N (2.92 ± 1.5) mg/L、TN (13.91 ± 5.85) mg/L; 无机氮占 TN 比例不超过 50%, 说明有机氮在次生盐碱水体中所占比例更高; (2) 环境因子 pH 与 NO_2^- -N 正相关, 与 NO_3^- -N 负相关, 盐度与 NO_3^- -N 负相关, pH 和盐度加剧了次生盐碱水 NO_2^- -N 的积累; (3) 水产养殖显著降低次生盐碱水体中 NO_3^- -N 浓度和碳酸盐碱度, 显示了盐碱水养殖对次生盐碱水的生态改良功能。本研究旨在为中国次生盐碱水的渔业开发利用提供科学依据。

关键词: 次生盐碱水; 氮转化; 理化因子; 盐碱水渔业; 西北地区

中图分类号: S912 **文献标志码:** A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1438-10

中国盐碱水资源丰富, 广泛分布在中国东北、华北、西北内陆及东部沿海 19 个省、市和自治区, 且呈逐年上升趋势^[1]。中国是拥有丰富低洼盐碱水资源的国家, 约有 0.46 亿 hm^2 的低洼盐碱水域资源, 但大部分长期处于荒弃状态, 自 1991 年起开始了盐碱水土渔业利用的尝试^[2], 2006 年以来, 在河北沧州以凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*)、梭鱼(*Mugil basilewskyi*)和莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)为主进行了盐碱水规模化养殖, 开创了非海洋性盐碱水资源利用的新途径, 推动了山东、江苏、天津等 10 余个省市的盐碱水养殖进程^[3]。多年实践证明盐碱水资源已成为新的养殖空间, 日益受到政府及学术界的关注, 周凯等^[4]、么宗利等^[5]就钙、镁、pH、碳酸盐碱度等对水生生物生存生长生理的影响进行了研究。然而西北内陆地区次生盐碱水存在 NO_2^- -N 偏

高现象, 成为水产养殖的主要制约因子, 探索其高 NO_2^- -N 成因, 将为中国次生盐碱水的渔业开发利用提供重要理论依据。

目前, 有关水体中氮的迁移、转化研究主要集中在地表水、地下水、农田、湿地等, 鲜少涉及次生盐碱水^[6-8]。次生盐碱水大多产生于地势低洼或排水不畅的灌区, 灌区由于化学氮肥的过量施用以及氮利用率不高, 导致灌区浅层地下水氮浓度偏高, 如宁夏引黄灌区^[8]灌排水总氮(TN)达 8.22 mg/L, NO_3^- -N 5.75 mg/L; 陕西灌区^[9]地下水 TN 为 8.95 mg/L, NO_3^- -N 8.06 mg/L。环境因子对氮转化存在影响, 土壤中盐碱会显著影响氮转化^[10-11], pH、氧化还原电位(ORP)对硝化反应具有显著影响^[12], 溶氧(DO)是氨化及亚硝酸盐氧化过程的制约因子^[13], 温度^[14]、光照^[15]等也对氨化及亚硝酸盐氧化过程存在影响。

收稿日期: 2020-03-31; **修订日期:** 2020-05-19.

基金项目: 国家重点研发计划课题子课题(2018YFF0213400); 中央级公益性科研院所基本业务费专项(2018Z02-03).

作者简介: 庄亚润(1994-), 男, 硕士研究生, 专业方向为水产养殖. E-mail: ianchng@qq.com

通信作者: 来琦芳, 研究员, 专业方向为水产养殖. E-mail: qifanglai@163.com

景泰县草窝滩镇位于中国西北干旱荒漠区的大型梯级扬水灌区景电灌区内, 由于地势低洼、降雨量小蒸发量大、以及只灌不排的农业利用方式使得研究区聚集了大量次生盐碱水, 导致次生盐碱化现象严重, 严重制约了农业生产的可持续发展^[16]。次生盐碱水是因人类活动不科学利用而产生的, 在新疆^[17]、甘肃^[18]、宁夏^[19]等西北地区尤为普遍。因此, 本文主要监测次生盐碱水体中无机三态氮以及 pH、盐度、ORP 等理化因子, 分析次生盐碱水体的氮转化及其主要影响因子, 以期探究次生盐碱水体中高浓度 NO_2^- -N 的产生原因, 为次生盐碱水渔业利用和产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

草窝滩镇渔农综合示范区位于 $104^{\circ}7'40''\text{E}$, $37^{\circ}19'6''\text{N}$, 占地面积约 40 hm^2 , 地处甘肃省白银市景泰县城以北 8.4 km, 景电一期灌区中心地带。其年均降雨量 180 mm, 年均蒸发量 2361 mm, 年均气温 10 ℃, 全年无霜期 159 d, 具有蒸发量大、冬冷夏热、昼夜温差大等温带干旱大陆性气候的特点^[20]。

1.2 样品采集

选取越冬前、越冬后养殖前期、养殖中期及养殖后期, 分别于 2018 年 10 月 26 日、2019 年 4 月 17 日、2019 年 6 月 29 日、2019 年 8 月 20 日进行定点采样, 采样点示意如图 1 所示, 并等距离设置重复样点 3 个。采样时间为上午 9 点至 12 点, 3 种次生盐碱水体为同源不同类型: (1)刚从土壤中渗出的次生盐碱水, 采自示范区排碱沟渠, 为刚从次生盐碱土壤中渗出的流动次生盐碱水, 简称流动水(flowing saline water, FSW); (2)静置一段时间的次生盐碱水, 采自示范区蓄水池, 从排水沟渠引入蓄水池静置作为养殖用水储备的次生盐碱水, 简称静置水(still saline water, SSW); (3)用于水产养殖生产的次生盐碱水, 采自示范区养殖池塘, 从蓄水池引入养殖池塘开展大宗淡水鱼养殖的次生盐碱水, 简称养殖水(aquaculture saline water, ASW); 蓄水池和养殖池塘根据水位

下降情况, 均会适量补水, 采样若遇补水则延迟 3 天以上。养殖池塘面积 6.86 hm^2 , 水深为 1.5~1.8 m, 养殖以鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)为主, 亩产 400 kg 左右。水样的采集、运输方法参照《水和废水分析监测方法》(第四版)^[21]。

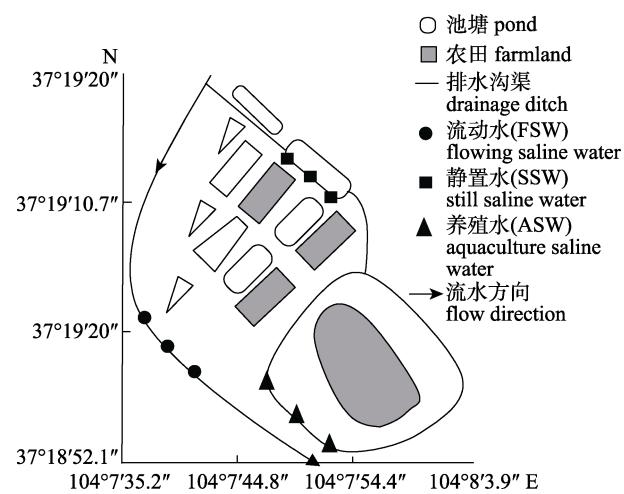


图 1 次生盐碱水研究区域及采样点示意
Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.3 测定指标及方法

实验室测定 NO_2^- -N 参考 GB 7493-87 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定; NH_4^+ -N 参考 GB 7479-87 采用纳氏试剂分光光度法; NO_3^- -N 参考 HJ/T 346-2007 采用紫外分光光度法; TN 参考 GB 11894-89 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; 碳酸盐碱度(carbonate alkalinity, C_A)采用酸标准溶液滴定法测定^[22]; 原位测定光照(illuminance)、水温(temperature, T)、盐度(salinity)、pH、ORP、DO, 光照采用光度计(TES 1339 Light Meter Pro, 中国)测定, 剩余指标采用多功能水质参数仪(YSI Professional Plus, 美国)测定。

1.4 统计方法

SPSS 18.0 统计软件进行数据统计分析, 用配对样本 t 检验对 3 种水体组间进行显著性差异分析; 用单因素方差分析(one-way ANOVA)对 3 种水体进行组内显著性差异分析, 若差异显著($P < 0.05$), 再用 Duncan's 多重检验比较各时间点的差异; 用 Pearson 相关分析对多个指标进行相关性分析。差异显著性水平为 $P < 0.05$, 差异极显著性

水平为 $P<0.01$, 均值数据结果以平均值±标准差($\bar{x}\pm SD$)表示。

2 结果与分析

2.1 3 种水体 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及 TN 的浓度

表 1 中 3 种水体 TN 无显著差异($P>0.05$), 但三态氮均存在显著差异($P<0.05$)。其中 NO_2^- -N 静置水、养殖水极显著高于流动水($P<0.01$), NH_4^+ -N 静置水、养殖水显著高于流动水($P<0.05$), NO_3^- -N 养殖水极显著低于流动水、静置水($P<0.01$)。

图 2 表明无机三态氮及 TN 受季节影响有波动, NO_2^- -N (0.3 ± 0.2) mg/L, NH_4^+ -N (1.93 ± 1.25) mg/L, NO_3^- -N (2.92 ± 1.5) mg/L, TN (13.91 ± 5.85) mg/L。 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 总和均远低于 TN, 除 4 月静置水外, 其他监测时间三态氮仅占 TN 15%~

表 1 次生盐碱水地区中 3 种水体氮的配对 t 检验
Tab. 1 Paired sample test on nitrogen among three patterns of water

组别	配对差值 paired difference			
	NO_2^- -N	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	TN
流动水-静置水 FSW-SSW	-0.21**	-1.30*	0.07	0.87
流动水-养殖水 FSW-ASW	-0.33**	-0.96*	-2.15**	-0.92
静置水-养殖水 SSW-ASW	-0.12	0.35	-2.23**	1.79

注: * 表示两种水体间存在显著差异($P<0.05$), ** 表示两种水体间存在极显著差异($P<0.01$)。

Note: * indicates a significant difference ($P<0.05$); ** indicates a extremely significant difference ($P<0.01$)。

50%, 表明次生盐碱水中除无机氮外存在一定比例有机氮。除流动水 NH_4^+ -N 无显著差异($P>0.05$)外, 3 种水体 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及 TN 均随时间变化存在显著差异($P<0.05$)。

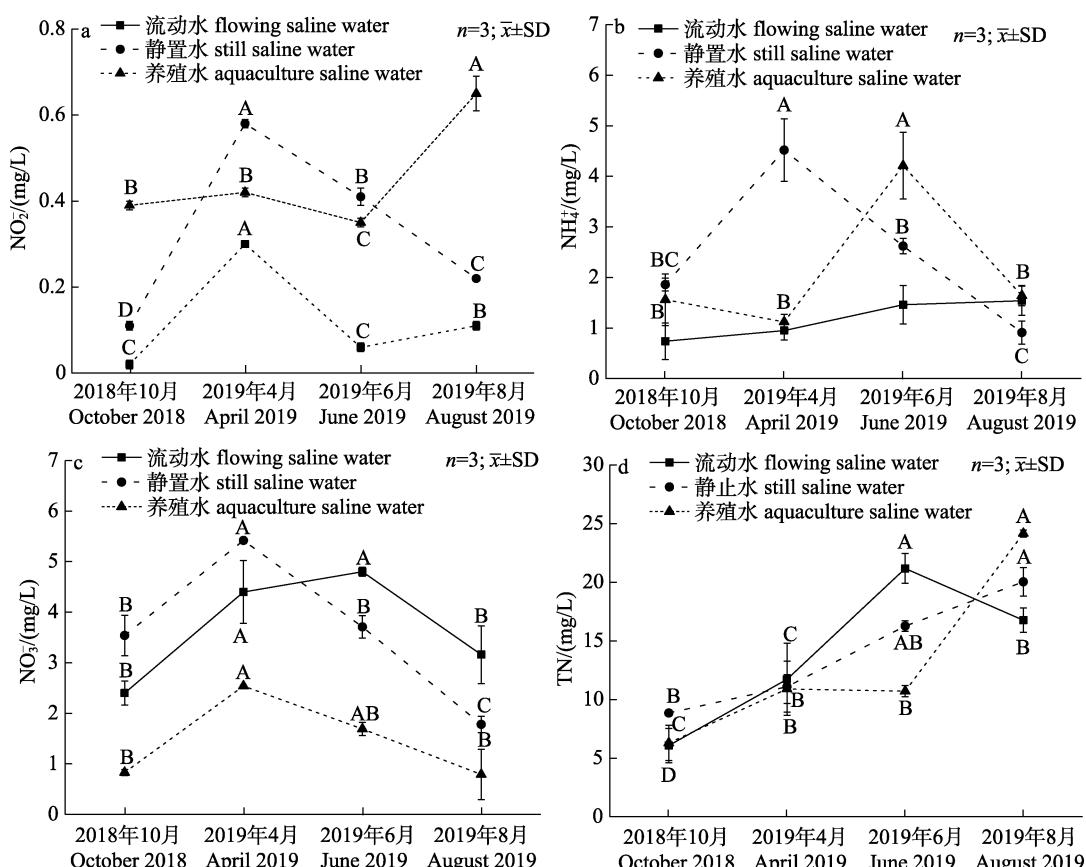


图 2 次生盐碱水地区 3 种水体中 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及 TN 浓度
大写字母表示同一类型水体在不同时间存在显著性差异($P<0.05$)。

Fig. 2 Concentration of NO_2^- -N, NH_4^+ -N, NO_3^- -N and TN among three patterns of water
Different capital letters indicate significant differences in the same pattern of water at different times ($P<0.05$).

3 种水体 NO_2^- -N 均随时间存在显著性差异 ($P<0.05$) (图 2a), 流动水和静置水的 NO_2^- -N 变化趋势相似, 4 月最高, 分别为 0.30 mg/L、0.57 mg/L; 10 月最低, 分别为 0.02 mg/L、0.11 mg/L。养殖水 8 月最高, 为 0.65 mg/L; 6 月最低, 为 0.35 mg/L。流动水 NH_4^+ -N 无显著性差异 ($P>0.05$) (图 2b), 其变化范围为 0.74~1.54 mg/L, 静置水及养殖水均随时间存在显著性差异 ($P<0.05$), 静置水 NH_4^+ -N 变化范围为 0.91~4.52 mg/L, 养殖水变化范围为 1.12~4.21 mg/L。流动水 NO_3^- -N 6 月最高, 为 4.79 mg/L (图 2c); 静置水与养殖水 NO_3^- -N 变化趋势相似, 均 4 月最高, 分别为 5.42 mg/L、2.54 mg/L, 但养殖水数值仅为静置水的 1/2。流动水 TN 6 月最高为 21.17 mg/L (图 2d), 静置水与养殖水 TN 变化趋势相似, 均 8 月最高, 分别为 20.03 mg/L、24.51 mg/L。

2.2 3 种水体盐碱指标的变化情况

表 2 流动水 pH、盐度均极显著低于静置水、养殖水 ($P<0.01$), 养殖水碳酸盐碱度极显著低于静置水 ($P<0.01$)。

图 3a 表明 3 种水体 pH 变化趋势不一, 静置水 8 月最高, 为 8.55; 流动水、养殖水均为 10 月最高, 分别为 8.26、9.00。3 种水体盐度均在 6 月达到最低值(图 3b), 分别为流动水 4.40、静置水 4.33 及养殖水 4.64, 这与 6 月当地农业灌溉渗出水增加有关。在养殖周期内养殖水碳酸盐碱度下降 0.95 mmol/L, 非养殖水(静置水及流动水)碳酸盐碱度下降范围为 0.24~0.40 mmol/L。

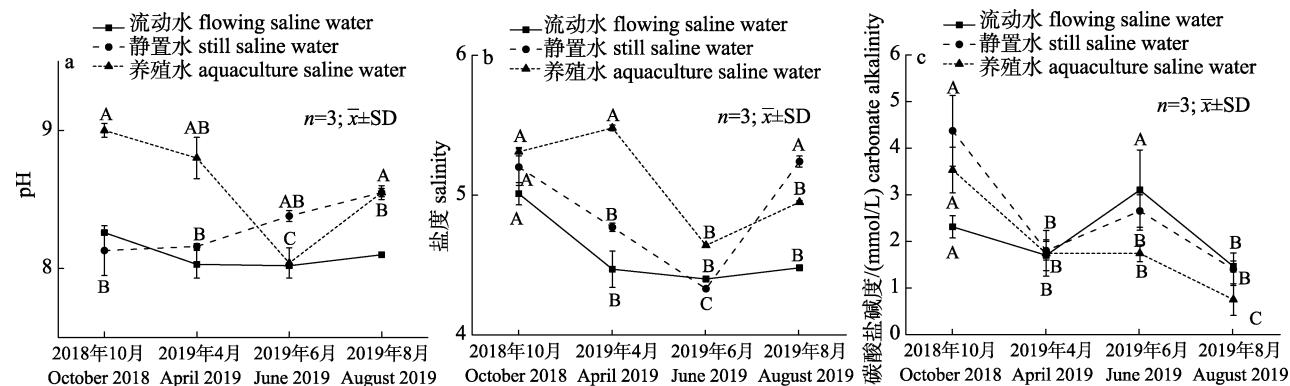


图 3 次生盐碱水地区 3 种水体盐碱指标的变化情况
大写字母表示同一类型水体在不同时间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

Fig. 3 Changes of salinity and alkalinity among three patterns of water
Different capital letters indicate significant differences in the same pattern of water at different times ($P<0.05$).

表 2 次生盐碱水地区 3 种水体盐碱指标的配对 t 检验

Tab. 2 Paired sample test on salinity and carbonate alkalinity among three patterns of water

组别	配对差值 paired difference		
	pH	盐度 salinity	碳酸盐碱度 C_A
流动水-静置水 FSW-SSW	-0.20**	-0.30**	-0.41
流动水-养殖水 FSW-ASW	-0.49**	-0.51**	0.20
静置水-养殖水 SSW-ASW	-0.29	-0.21	0.62**

注: * 表示两种水体间存在显著差异 ($P<0.05$); ** 表示两种水体间存在极显著差异 ($P<0.01$)。

Note: * indicates a significant difference ($P<0.05$); ** indicates a extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3 3 种水体环境因子的变化情况

表 3 流动水温度、DO 与静置水、养殖水均存在极显著差异 ($P<0.01$), 三者光照及 ORP 均无显著差异 ($P>0.05$)。

图 4 中 3 种水体水温、光照、ORP、DO 均随时间变化存在显著差异 ($P<0.05$)。图 4a 表明 3 种水体水温变化相似, 均在 6 月达到峰值, 同一时间下流动水水温极显著低于静置水及养殖水 ($P<0.01$); 相同时间下 3 种水体光照无显著差异 ($P>0.05$) (图 4b); 3 种水体 ORP 变化范围均为 67.9~158.8 mV (图 4c), 且同一时间下不同水体间 ORP 变化均无显著差异 ($P>0.05$); 三者 DO 均随时间变化存在显著差异 ($P<0.05$) (图 4d), 4 月流动水及静置水最高, 分别为 12.31 mg/L、11.15 mg/L, 10 月养殖水最高, 为 11.00 mg/L。

表 3 次生盐碱水地区 3 种水体环境因子的配对 t 检验

Tab. 3 Paired sample test on environmental factors among three patterns of water

组别 group	配对差值 paired difference			
	水温 T	光照 illuminance	ORP	DO
流动水-静置水 FSW-SSW	-2.9**	-0.18	10.0	1.18**
流动水-养殖水 FSW-ASW	-2.3**	0.64	9.5	1.70**
静置水-养殖水 SSW-ASW	0.5	0.82	-0.5	0.52

注: * 表示两种水体间存在显著差异($P<0.05$); ** 表示两种水体间存在极显著差异($P<0.01$)。

Note: * indicates a significant difference ($P<0.05$); ** indicates a extremely significant difference ($P<0.01$).

2.4 水体理化因子的 Pearson 相关分析

表 4 NO_2^- -N 与 NH_4^+ -N 极显著相关($P<0.01$); NO_2^- -N 与碳酸盐碱度、水温及 pH 显著性相关

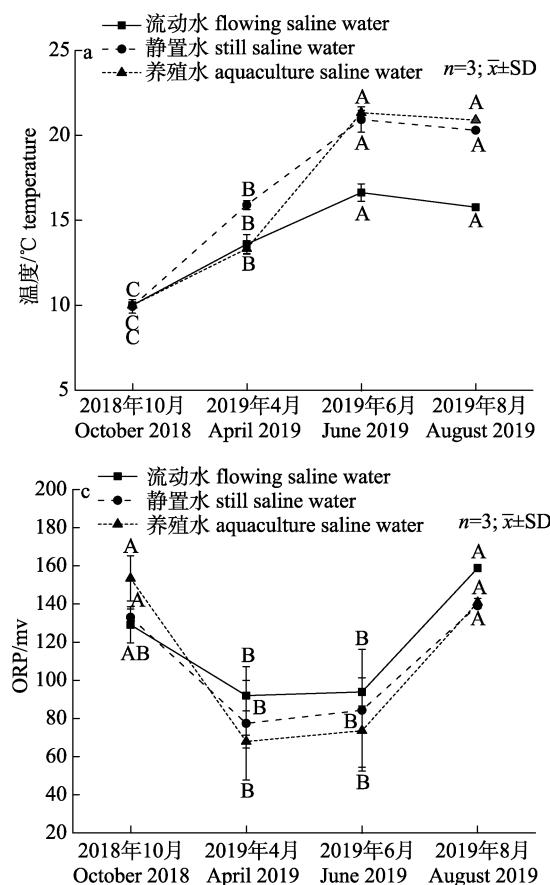


图 4 次生盐碱水地区 3 种水体环境因子的变化情况

大写字母表示同一类型水体在不同时间存在显著性差异($P<0.05$)。

Fig. 4 Changes of environmental factors among three patterns of water

Different capital letters indicate significant differences in the same pattern of water at different times ($P<0.05$).

($P<0.05$); NH_4^+ -N 与光照极显著相关($P<0.01$), 与水温、ORP 显著性相关($P<0.05$); NO_2^- -N 与 ORP、盐度、pH 及光照极显著相关($P<0.01$); TN 与水温、DO 极显著相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 次生盐碱水中无机氮的变化特征

研究区 TN 年均值(13.91 ± 5.85) mg/L, 约是 V 类地表水环境质量标准的 7 倍, NO_2^- -N 为(0.3 ± 0.2) mg/L, NH_4^+ -N 为(1.93 ± 1.25) mg/L, 均超过中国农业灌溉用水水质标准。灌区耕地生产施用过量氮肥、人为漫灌加上低洼封闭的独特地势、以及降雨少蒸发量大的气候条件, 造成了次生盐碱土壤中的氮浓度较高; 浅层地下水中的无机氮增加是土壤与地表水中氮源的增加作用的结果^[23], 研究区为退耕次生盐碱地, 土壤中高浓度氮肥是

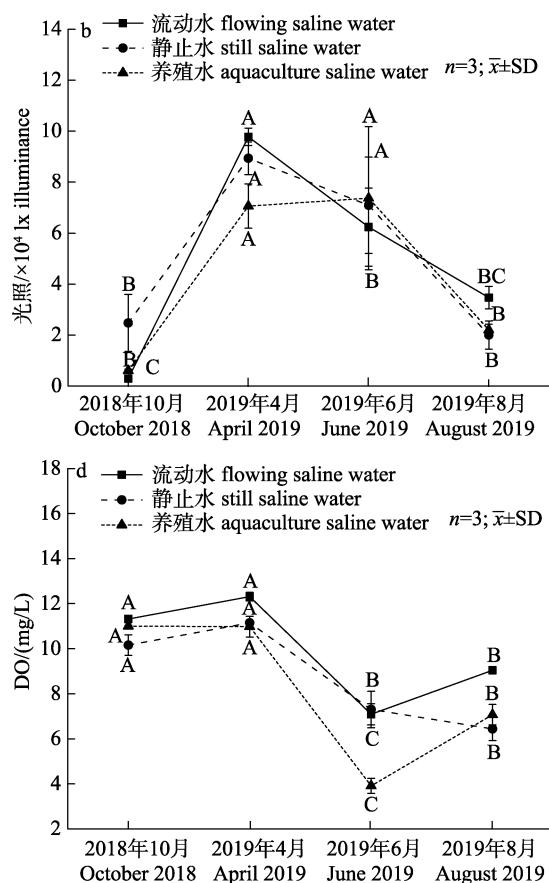


图 4 次生盐碱水地区 3 种水体环境因子的变化情况

大写字母表示同一类型水体在不同时间存在显著性差异($P<0.05$)。

Fig. 4 Changes of environmental factors among three patterns of water

Different capital letters indicate significant differences in the same pattern of water at different times ($P<0.05$).

表 4 次生盐碱水地区 3 种水体理化因子的 Pearson 相关分析
Tab. 4 Pearson correlation analysis of water physicochemical parameters

指标 factor	相关系数 correlation coefficient									
	NO ₂ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ -N	TN	碳酸盐 碱度 C _A	温度 T	ORP	DO	盐度 salinity	pH
NO ₂ -N										
NH ₄ ⁺ -N	+0.453**									
NO ₃ -N										
TN										
碳酸盐碱度 C _A	-0.397*									
温度 T	+0.404*	+0.378*		+0.658**	-0.540**					
ORP		-0.413*	-0.451**							
DO				-0.544**		-0.816**				
盐度 salinity			-0.521**			-0.430**				
pH	+0.396*		-0.632**						+0.699**	
光照 illuminance		+0.434**	+0.620**			-0.810**		-0.490**	-0.387*	

注: *表示相关性显著($P<0.05$), **表示相关性极显著($P<0.01$), +表示正相关性, -表示负相关性。

Note: * means significant correlation ($P<0.05$); ** means extremely significant correlation ($P<0.01$); + means positive correlation, and - means negative correlation.

次生盐碱水中无机氮的主要来源, 根据全国地下水水质分布及变化特征调查, 西北地区三态氮超标均严重^[24], 因此, TN、无机氮源本底值高是西北地区次生盐碱水体普遍具有的特点。

本研究监测发现水中无机氮仅占 TN 的 15%~50%, 说明次生盐碱水体中有机氮比例更高。有机氮的矿化作用可形成大量 NH₄⁺-N^[13], 推进 N 向 NO₂-N 和 NO₃-N 的转化, 导致次生盐碱水体中 NH₄⁺-N、NO₂-N 和 NO₃-N 浓度均处于高水平, 有机氮的矿化作用也是次生盐碱水无机三态氮长期处于较高浓度的主要因素之一。长期高 NO₂-N (>0.1 mg/L) 可抑制养殖动物载氧能力, 严重影响其生长发育^[25], 因此高浓度 NO₂-N 成为次生盐碱水渔业利用的瓶颈问题。

3.2 无机氮与环境因子的关系

通过相关性分析, pH、盐度、温度、光照、ORP、DO 与 TN 和无机三态氮均存在不同程度的相关性。

3.2.1 pH 与 NO₂-N 存在显著正相关 pH 影响途径与氨氧化及亚硝酸盐氧化有关。苗永君^[26]研究发现在 pH 8~9 时, 可以提高氨氧化古菌(AOA)及氨氧化细菌(AOB)活性, 促进氨氧化反应, 使

NH₄⁺-N 向 NO₂-N 转化, 导致次生盐碱水体的 NO₂-N 浓度升高; 刘玉廷等^[14]发现在 pH 7~11 范围内, 随着 pH 升高抑制了亚硝酸盐氧化过程的发生, NO₂-N 向 NO₃-N 的转化受到抑制, 使 NO₂-N 浓度一直处于较高水平。吴海燕等^[27]也发现在碱性环境下水体的 NO₂-N 浓度是酸性环境的两倍。因此, pH 作用下氨氧化反应的促进和亚硝酸盐氧化反应的被抑制, 是导致次生盐碱水体长期高 NO₂-N 的主要因素。

3.2.2 盐度与 NO₃-N 存在显著负相关 高盐环境引起 NO₂-N 的积累。崔有为等^[28]发现当盐度超过 8 g/L 时、好氧池 NO₂-N 积累率超过 80%; Bassin 等^[29]也发现好氧反应器中盐度到达 22 g/L 可观察到 NO₂-N 的高度累积。因此, 次生盐碱水中 NO₃-N 浓度随着盐度的升高而降低, 有利于 NO₂-N 积累。

3.2.3 温度与 NH₄⁺-N、NO₂-N 均存在显著正相关

温度的升高促进了有机氮的矿化作用及氨氧化过程, 促进了水体 NO₂-N 的生成。研究区位于西北干旱地区, 干旱少雨且日照时数长, 导致水温升高、水体蒸发量大^[20]。虎瑞等^[30]研究发现夏季有机氮的矿化速率显著高于其他月份, 使 NH₄⁺-

N 处于较高水平; Nakamura 等^[31]发现有光条件下可促进 AOB 的活性, 显著提高 NH₄⁺-N 的转化速率; 光照强度的增加促进了水中藻类的光合作用, 有利于菌藻共生系统对 NH₄⁺-N 的去除, 促进 NO₂⁻-N 的形成^[15]。研究区光照强度增加引起水温升高水体蒸发, 可能促进有机氮矿化导致 NH₄⁺-N 浓度上升。研究区的 ORP 范围在 60~200 mV 之间与 NH₄⁺-N 呈显著负相关, ORP 值越小越有利于 NH₄⁺-N 的不断积累, 从而影响 NO₂⁻-N 浓度。氨氧化及亚硝酸盐氧化在 DO 充足时可有效促进硝化作用去除 NO₂⁻-N^[32], 但曾对研究区水样进行人工增氧, NO₂⁻-N 浓度并未降低, 本研究 DO 值与 TN 呈极显著负相关($P<0.01$), DO 可能与微生物参与有机氮矿化作用相关。

综上所述, 次生盐碱水体中 pH、盐度均对 NO₂⁻-N 的积累产生显著影响, 温度、光照、ORP 和 DO 等对 NO₂⁻-N 的积累具有一定协同作用。

3.3 次生盐碱水的渔业养殖利用

与刚产生的次生盐碱水和静置一段时间的次生盐碱水相比, 本研究发现经过水产养殖的次生盐碱水 NO₃⁻-N 浓度显著降低。NO₃⁻-N 为浮游植物的繁殖提供了充足的氮源, 被同化成有机氮化物^[33], 且浮游植物的增加为养殖动物提供了更多的食物来源^[34], 植物有机氮又转变成养殖动物体内的蛋白质, 通过能量流动循环, 使水体中无机氮得到了有效利用; 此外养殖盐碱水中碳酸盐碱度由原来的 3.52 mmol/L 下降至 0.75 mmol/L, 远低于未被渔业利用的次生盐碱水, 水产养殖可以促进水体微生物的多样性, 微生物的代谢产物可有效降低水体的碳酸盐碱度^[35]。因此水产养殖通过促进次生盐碱水碳、氮的生地化循环进程, 对次生盐碱水土的生态具有一定的改良作用。

4 结论

(1) 次生盐碱水高 NO₂⁻-N 与无机氮源本底值高、有机氮矿化作用有关, pH、盐度是造成 NO₂⁻-N 高的主要环境因子, 摸清次生盐碱水的菌群组成, 尤其是 N 转化相关的功能菌群对无机氮转化的影响, 将为次生盐碱高 NO₂⁻-N 水质的改良调控提供理论依据。(2) 次生盐碱水的水产养殖可降低水中

NO₃⁻-N 浓度和碳酸盐碱度, 具有一定的生态改良功能, 如何选择适宜的渔业利用模式, 促进次生盐碱水碳、氮的生地化循环, 提升其生态改良功能, 是今后盐碱水渔业开发利用的技术关键。

参考文献:

- [1] Ye B, Cheng Z Y, Peng M X, et al. Effects of pH and carbonate alkalinity on survival rate, Na⁺/K⁺-ATPase activity and phagocytic ability of the razor clam (*Sinonovacula constricta*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1723-1732. [叶博, 程之扬, 彭茂潇, 等. 急性 pH 和碳酸盐碱度对缢蛏存活率、Na⁺/K⁺-ATPase 活力及血淋巴吞噬能力的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1723-1732.]
- [2] Zhang W S, Zhu F H, Huang S F, et al. Benefit evaluation of improving freshwater fish to improve saline-alkali land [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 1992, (01): 42-43, 16. [张文山, 朱逢海, 黄松飞, 等. 养淡水鱼改良盐碱地的效益评价[J]. 农业技术经济, 1992, (01): 42-43, 16.]
- [3] Liu Y X, Fang H, Lai Q F, et al. The current state and development strategy for China's saline-alkaline fisheries [J]. Engineering Science, 2016, 18(3): 74-78. [刘永新, 方辉, 来琦芳, 等. 我国盐碱水渔业现状与发展对策[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 74-78.]
- [4] Zhou K, Lai Q F, Wang H, et al. Acute toxicity effects of calcium and magnesium on larva of *Litopenaeus vannamei* [J]. Marine Sciences, 2007, 31(7): 4-7. [周凯, 来琦芳, 王慧, 等. Ca²⁺、Mg²⁺对凡纳滨对虾仔虾生存的影响[J]. 海洋科学, 2007, 31(7): 4-7.]
- [5] Yao Z L, Wang H, Zhou K, et al. Effects of water carbonate alkalinity and pH on survival rate of post-larval *Litopenaeus vannamei* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(5): 945-950. [么宗利, 王慧, 周凯, 等. 碳酸盐碱度和 pH 值对凡纳滨对虾仔虾存活率的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 945-950.]
- [6] Yu J W, Zhou J L, Zeng Y Y, et al. Spatial distribution and influencing factors of "Three-Nitrogen" in Groundwater of the eastern area of Kashgar, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(11): 2402-2410. [於嘉闻, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆喀什地区东部地下水“三氮”空间分布特征及影响因素[J]. 环境化学, 2016, 35(11): 2402-2410.]
- [7] Chen J L. Hydrochemical characteristics and its evolution modeling of groundwater in Jinta Basin, Gansu [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. [陈建龙. 甘肃金塔盆地地下水水化学特征及其演化模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.]
- [8] Zhang X J, Chen X Q, Liu H B, et al. Preliminary study on nitrogen and phosphorus loss in Yellow River irrigated paddy field of Ningxia [J]. Ecology and Environment, 2010,

- 19(5): 1202-1209. [张学军, 陈晓群, 刘宏斌, 等. 宁夏引黄灌区稻田氮磷流失特征初探[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1202-1209.]
- [9] Han C B. The distribution of three nitrogen and origin analysis in groundwater in Jinghuiqu irrigation area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. [韩彩波. 泾惠渠灌区地下水三氮分布特征及其影响因素的研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.]
- [10] Li J B, Huang G H. Pilot study of salinity (NaCl) affecting nitrogen transformation in silt loam soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(5): 98-103. [李建兵, 黄冠华. 盐分对粉壤土氮转化的影响[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 98-103.]
- [11] Xu W L, Liu H, Zhang Y S. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in salinized soils of Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2007, 35(11): 141-145. [徐万里, 刘骅, 张云舒. 新疆盐渍化土壤氮素矿化和硝化作用特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 141-145.]
- [12] Lyu X L, Liu J T, Zhou B, et al. Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(2): 42-50. [吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 42-50.]
- [13] Lin W. Ammonification efficiency of organic nitrogen under anaerobic and aerobic conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018. [林炜. 有机氮在厌氧及好氧生化条件下氨化效果的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.]
- [14] Liu Y T, Liu W S, Yang T J, et al. Isolation, identification and degradation characteristics of a nitrite-degrading strain[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 1171-1180. [刘玉廷, 刘文舒, 杨天俊, 等. 一株亚硝酸盐降解菌的分离鉴定及其降解特性[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 1171-1180.]
- [15] Li Z X, Fan D, Na N, et al. Study on the effect of light condition on single-stage nitrogen removal in bacteria-algae symbiosis system[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(10): 78-82. [李竺芯, 樊迪, 那娜, 等. 光照条件对菌藻共生系统单级脱氮的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 78-82.]
- [16] Xu C D, Cheng H, Wang Y, et al. Improved multi-level fuzzy evaluation model based on cloud theory for evaluation of soil salinization degree[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 88-95. [徐存东, 程慧, 王燕, 等. 灌区土壤盐渍化程度云理论改进多级模糊评价模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 88-95.]
- [17] Liu H L, Chu G X, Zhao F M, et al. Study on the variation and trend analysis of soil secondary salinization of cotton field under long-term drip irrigation condition in northern Xinjiang[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(4): 12-17. [刘洪亮, 褚革新, 赵凤梅, 等. 北疆棉区长期膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化与次生盐渍化趋势分析[J]. 中国土壤与肥料, 2010(4): 12-17.]
- [18] Yang J W. Study on soil microbial quantity, soil enzyme activity and physicochemical factor in various saline-alkali soil in Hexi Corridor[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2012. [杨建文. 甘肃河西地区不同盐碱土壤微生物数量、酶活及理化因子的研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2012.]
- [19] Liu G F, Xu Z H, Yao Z L, et al. Effects of irrigation on the salt ions in sulfate-type saline-alkali soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 118-123. [刘国锋, 徐增洪, 么宗利, 等. 冲水灌溉对西北硫酸盐型土壤中盐分离子变化的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 118-123.]
- [20] Wang R R, Xu C D, Liu H, et al. Spatio-temporal succession characteristics of saline-alkali soil profile salt in Jingdian Irrigation District[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 244-249, 266. [王荣荣, 徐存东, 刘辉, 等. 景电灌区盐碱耕地土壤剖面盐分时空演替特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 244-249, 266.]
- [21] Editorial Board of *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method*, State Environmental Protection Administration. *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method*[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002]
- [22] Liu F, Li J, Li J T, et al. Effects of carbonate alkalinity stress on the survival, growth, reproduction, and immune enzyme activities of Exopalaemon carinicauda[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(5): 1137-1147. [柳飞, 李健, 李吉涛, 等. 碳酸盐碱度对脊尾白虾生存、生长、繁殖及免疫酶活性的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1137-1147.]
- [23] Xu K. Progress on three forms of nitrogen contaminant transport and transform in groundwater[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(8): 32-35. [许可. 地下水中三氮污染物研究综述与展望[J]. 工程勘察, 2012, 40(8): 32-35.]
- [24] Li S P, Li W P, Yin X L, et al. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to

- 2017[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(6): 1-8. [李圣品, 李文鹏, 殷秀兰, 等. 全国地下水水质分布及变化特征[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 1-8.]
- [25] Wang Y B, Xu X S, Deng Y S. Toxicity of ammonia and nitrite aquaculture and the control measures[J]. *Feed Industry*, 2002, 23(12): 46-48. [王彦波, 许梓荣, 邓岳松. 水产养殖中氨氮和亚硝酸盐氮的危害及治理[J]. *饲料工业*, 2002, 23(12): 46-48.]
- [26] Miao Y J. Study on soil bacteria and nitrogen-cycling functional microorganisms of different landuse types in the Yellow River Delta[D]. Jinan: Shandong University, 2019. [苗永君. 黄河三角洲不同土地利用类型土壤细菌和氮循环功能菌群研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.]
- [27] Wu H Y, Fu S F, Cai X Q, et al. Spatial variation of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(9): 3203-3211. [吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 等. 东山岛地下水“三氮”空间分布特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3203-3211.]
- [28] Cui Y W, Peng Y Z, Li J. Salt effects on treatment performance and microbial community structure in MUCT[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(2): 488-492. [崔有为, 彭永臻, 李晶. 盐度抑制下的MUCT处理效能及其微生物种群变化[J]. *环境科学*, 2009, 30(2): 488-492.]
- [29] Bassin J P, Pronk M, Muyzer G, et al. Effect of elevated salt concentrations on the aerobic granular sludge process: Linking microbial activity with microbial community structure[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(22): 7942-7953.
- [30] Hu R, Wang X P, Pan Y X, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen mineralization of biological soil crusts and soil system during growing season in Shapotou, Northern China[J]. *journal of desert research*, 2016, 36(1): 174-180. [虎瑞, 王新平, 潘颜霞, 等. 沙坡头地区生物土壤结皮-土壤系统生长季氮矿化动态[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 174-180.]
- [31] Nakamura Y, Satoh H, Kindaichi T, et al. Community structure, abundance, and in situ activity of nitrifying bacteria in river sediments as determined by the combined use of molecular techniques and microelectrodes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(5): 1532-1539.
- [32] Xi B D, Xu H D, Zhai L H, et al. Effect of pH on retention of N and P in ditch sediments[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(7): 490-494. [席北斗, 徐红灯, 翟丽华, 等. pH 对沟渠沉积物截留农田排水沟渠中氮、磷的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(7): 490-494.]
- [33] Zhang S L, Xing K Z, Chen B. Studies on the relationship between phytoplankton and environmental factors of the alkalinites composed of HCO_3^- type in shrimp pond[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(1): 145-148. [张树林, 邢克智, 陈斌. 重碳酸盐型盐碱虾池浮游植物与理化因子的相关关系[J]. *华北农学报*, 2008, 23(1): 145-148.]
- [34] Yang J L, Gao Q F, Dong S L, et al. Effect of silver carp culture on the composition of plankton and suspended particulate matter in polyculture ponds[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(10): 23-29. [杨建雷, 高勤峰, 董双林, 等. 草鱼、鲢鱼和鲤鱼混养池塘中浮游生物和悬浮颗粒物组成变化的研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(10): 23-29.]
- [35] Zhao X G, Luo H, Liu Q G, et al. Influence of the cultured *Odontobutis obscurus* to the microbial community structure and diversity in rice-fish system[J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, 47(4): 8-14. [赵翔刚, 罗衡, 刘其根, 等. 稻田养殖沙塘鳢对稻田水体及底泥微生物群落结构及多样性的影响[J]. *淡水渔业*, 2017, 47(4): 8-14.]

Correlation between inorganic nitrogen transformation and environmental factors in secondary saline-alkali water in northwest China

ZHUANG Yarun^{1,2}, SUN Zhen¹, ZHOU Kai¹, ZHU Xinglong³, GAO Baode³, GAO Pengcheng¹, LAI Qifang¹

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Fisheries Technology Extension Center of Jingtai, Baiyin 730400, China

Abstract: NO₂⁻-N in secondary saline-alkali water in Northwest China has been at a relatively high concentration for a long time, which has seriously restricted the sustainable development of the saline-alkali aquaculture industry. Based on regular fixed-point monitoring of the Caowutan Fisheries and Agriculture Demonstration Area (104°7'40"E, 37°19'6"N) in Jingtai, Gansu, inorganic nitrogen conversion in different types of secondary saline-alkali water and its correlation with environmental factors were studied by paired sample *t* test, Duncan multiple comparison, and Pearson's correlation analysis. The results showed that: (1) inorganic tri-state nitrogen (NO₂⁻-N, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N) and total nitrogen (TN) in the secondary saline-alkali water were at high concentrations and fluctuated seasonally [NO₂⁻-N (0.3±0.2) mg/L, NH₄⁺-N (1.93±1.25) mg/L, NO₃⁻-N (2.92±1.5) mg/L, TN (13.91±5.85) mg/L]. The proportion of inorganic nitrogen in TN was below 50%, indicating that the proportion of organic nitrogen in secondary saline-alkali water was higher; (2) pH was positively correlated with NO₂⁻-N, negatively correlated with NO₃⁻-N, and salinity was negatively correlated with NO₃⁻-N, pH and salinity aggravated the accumulation of NO₂⁻-N; (3) aquaculture significantly reduced NO₃⁻-N and carbonate alkalinity in secondary saline-alkali water, showing ecological improvement of saline-alkali aquaculture to secondary saline-alkali water.

Key words: secondary saline-alkali water; inorganic nitrogen transformation; physicochemical factor; saline-alkali fishery; northwest China

Corresponding author: LAI Qifang. E-mail: qifanglai@163.com