

RESUM

Es presenten un seguit de treballs que tenen com objectiu final estudiar el cicle del ferro a l'Estany de Banyoles, i la incidència que pot tenir sobre el desenvolupament del bacteris fototròfics del sofre. Inicialment, l'estudi compara el cicle limnològic de tres cubetes situades a l'anomenat lòbul Nord de l'Estany de Banyoles (C-III, C-IV i C-VI). Les diferències que es troben entre elles radiquen fonamentalment en el comportament de l'estratificació (C-III i C-IV són meromíctiques presentant diferents graus d'estabilitat i C-VI és holomíctica) i expliquen la dinàmica de les poblacions de bacteris fototròfics que creixen a cada una d'elles.

L'estudi es centra especialment en el cicle del ferro el qual és rellevant a C-IV durant una bona part del cicle anual. Posteriorment es descriu la dinàmica de les poblacions de bacteris fototròfics del sofre a les tres cubetes, per acabar aprofundint en les possibles relacions entre aquests bacteris i el ferro.

El ferro soluble (Fe^{2+}) es distribueix pel monimolimnion de C-IV durant tota la primavera i part de l'estiu, assolint concentracions màximes de $70 \mu\text{M}$. L'acumulació de ferro es produeix per dues vies. Una és l'alliberament de ferro des del sediment per reducció del ferro oxidat durant l'hivern i present a la part superior d'aquest sediment. L'altra via és l'entrada de Fe^{2+} per les surgències del fons, especialment S_4 havent-se mesurat velocitats d'entrada de $1350 \text{ mmol Fe}^{2+} \cdot \text{h}^{-1}$, quantitat que correspon aproximadament al 40 % del total acumulat durant aquesta època. L'alliberament de ferro des del sediment però és limitat en el temps, mentres que l'entrada de Fe^{2+} per les surgències és contínua durant tot el cicle anual. El ferro és posteriorment eliminat de l'aigua per la producció de sulfhídric del sediment i la formació de FeS , el qual pot trobar-se en diferents formes i solubilitats. S'han calculat valors de $-\log pK_s$ per al FeS que oscilen entre 2 i 4, corresponents al FeS amorf ("mackinawita"). Aquests valors augmentaven a mida que avançava l'estiu. Per tant, C-IV experimenta una alternança entre els cicles del ferro i del sofre, els quals interaccionen químicament. Aquesta interacció finalitza amb la desaparició del Fe^{2+} de la columna d'aigua. Tant l'acumulació de ferro al monimolimnion, com la posterior desaparició (precipitació en forma de FeS) han estat monitoritzats al llarg dels anys 1988 i 1989, havent arribat a la confecció d'un model cinètic que descriu matemàticament aquesta dinàmica.

El creixement de les comunitats de bacteris fototròfics del sofre a les cubetes estudiades estava fortament limitat per la quantitat de llum que arri-

bava al punt on es desenvolupaven. Tant les Cromatiàcies com les Clorobiàcies mostren adaptacions similars a la manca de llum augmentant la proporció carotenoides/bacterioclorofil·la. D'altra banda la dinàmica d'estratificació pròpia de cada cubeta situava el gradient oxigen/sulfhídric a una fondària diferent a cada una d'elles, determinant el moment i la quantitat amb els que aquests bacteris podien trobar-se però no les espècies que componien les comunitats. S'han aïllat i identificat les següents espècies: *Chromatium minus*, *Chlorobium limicola* i *Chlorobium phaeobacteroides*. *C. limicola* només es va poder aïllar de C-VI mentres que les altres dues són comunes a les tres cubetes.

Dos aspectes destacables que tenen a veure a la vegada amb el cicle del ferro i els bacteris fototròfics del sofre a C-IV són:

1. una densa població de *Chlorobium phaeobacteroides* creixent en un ambient ferrós amb sulfhídric pràcticament indetectable
2. la similitud entre les distribucions de Fe^{2+} i *Chlorobium phaeobacteroides*, amb màxims coincidint en el temps i l'espai.

Aquestes observacions suggereixen l'existència d'una relació ecològica i fisiològica entre el ferro i els bacteris fototròfics que pot ser interpretada en termes d'adaptació d'aquests microorganismes a condicions de concentració de sulfhídric extremadament baixes. Al laboratori, el Fe^{2+} s'uneix passivament a *Chlorobium phaeobacteroides* el qual pot adsorbir fins a $1 \mu g$ de Fe^{2+} / μg Bclor e. Cultius purs, tant d'aquest microorganisme com de *Chlorobium limicola*, incubats amb medi "Pfennig" amb l'equivalent a 0.5 mM de FeS ($44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) i en condicions saturants de llum, oxiden fotosintèticament el FeS a sofre elemental i Fe^{2+} lliure. Les Cromatiàcies en canvi no mostraven aquesta facultat. Els resultats d'aquests experiments ajuden a interpretar les observacions remarcades anteriorment, com una estratègia d'adaptació a condicions que es poden considerar poc favorables i que els conferiria avantatge selectiu en front a altres grups.

ABSTRACT

A series of investigations that study the iron cycle in Banyoles lake, as well as its incidence on the development of phototrophic sulfur bacteria, is presented. First, three basins located at the North area of Banyoles Lake (C-III, C-IV and C-VI) are compared. The differences found among them, are mainly in the differential behavior of the stratification (C-III and C-VI are meromictic with different degrees of stability, whereas C-IV is holomictic), and explain the dynamics of phototrophic sulfur bacteria at each basin. A more detailed focus is made on the iron cycle in C-IV during a extended period of time. Afterwards, the dynamics of phototrophic bacteria populations growing in this basin is described on the basis of their apparent relationship to iron.

Soluble iron (Fe^{2+}) can be found in the monimolimnion of C-IV during the whole spring and early summer, reaching maximal concentrations up to $70 \mu M$. It accumulates by two ways. One is the release of Fe^{2+} from the sediment. The other is the inflow from the bottom springs, particularly S_4 , which carries Fe^{2+} up at a measured rate of $1350 \text{ mmol } Fe^{2+} \cdot h^{-1}$, contributing roughly 40 % of the total accumulated Fe^{2+} . However, the release of soluble iron from sediment is temporal (spring and early summer), while iron enters C-IV from the bottom springs all year long. Once sulfide production in sediment begins to be significant, iron is removed from the solution in the form of FeS , decreasing its concentration drastically. This compound has been found as amorphous FeS (mackinawite), with calculated values for $-\log pK_s$ ranging from 2 to 4. In summary, C-IV shows an alternation of both the iron and sulfur cycles, which chemically interact resulting in the precipitation of Fe^{2+} in the form of FeS . Both the accumulation of Fe^{2+} and its removal have been monitored during 1988 and 1989, and a kinetic model mathematically describing the behavior of iron has been developed.

The growth of phototrophic bacteria communities in the studied basins was strongly limited by the quantity of available light at the depth where they were found. Both Chlorobiaceae and Chromatiaceae show similar adaptations to light limiting conditions, increasing their carotenoid/bacteriochlorophyll ratio. On the other hand, the depth of the oxic/anoxic boundary was different at each basin depending on the stratification dynamics. This fact has a strong affect on both the quantity and time of appearance of phototrophic bacteria, but does not on influence the relative composition of such communities. The following species have been isolated from Banyoles Lake: *Chromatium minus*, *Chlorobium limicola* and *Chlorobium phaeobacteroides*. *C. limicola* could only be isolated from C-VI,

while the other two species are commonly found in each of the tree studied basins.

Two remarkable aspects dealing both with the iron cycle and sulfur phototrophic bacteria in C-IV are:

1. A dense population of *Chlorobium phaeobacteroides* growing in a ferrous environment, in which sulfide was almost undetectable
2. The similar pattern of distribution of Fe^{2+} and *Chlorobium phaeobacteroides*, showing peaks that coincide in space and time.

These observations suggest an ecological and physiological relationship between iron and those microorganisms, that can be interpreted as a mechanism of adaptation to conditions of extremely low sulfide concentrations. Under laboratory conditions, Fe^{2+} is passively adsorbed by *Chlorobium phaeobacteroides*, in quantities up to $1 \mu g$ of $Fe^{2+}/\mu g$ *Bchlor e.* Pure cultures of *C. phaeobacteroides* and *C. limicola*, incubated with "Pfennig" medium containing $44 mg \cdot L^{-1}$ of FeS (the equivalent to $0.5 mM$ of Fe^{2+} and $0.5 mM$ of S^{2-}), oxidized this compound photosynthetically to elemental sulfur and ferrous iron. Chromatiaceae did not show this ability. The results of these experiments support the hypothesis of an adaptation of Chlorobiaceae to adverse environmental conditions, providing a better understanding of the above mentioned observations.