

Tổng hợp kiến thức: Sự lan truyền xung thần kinh trên sợi thần kinh có bao miêlin

Trong hệ thần kinh của động vật có xương sống, thông tin được truyền đi dưới dạng các tín hiệu điện gọi là xung thần kinh. Tốc độ và hiệu quả của sự lan truyền này là yếu tố quyết định khả năng phản ứng nhanh nhạy của cơ thể. Sợi thần kinh có bao miêlin đóng vai trò then chốt trong việc tối ưu hóa quá trình này thông qua một cơ chế đặc biệt gọi là lan truyền theo lối "nhảy cóc".

1. Cấu tạo của sợi thần kinh có bao miêlin

Để hiểu được cơ chế lan truyền, trước hết cần nắm vững cấu tạo của sợi thần kinh có bao miêlin.

- **Sợi trục (Axon):** Là phần kéo dài của nơron, có chức năng dẫn truyền xung thần kinh.
- **Bao miêlin:** Là một lớp vỏ bọc cách điện, được tạo bởi tế bào Schwann (ở hệ thần kinh ngoại biên) hoặc tế bào ít nhánh (ở hệ thần kinh trung ương) quấn quanh sợi trục. Bản chất của bao miêlin là photpholipit, có màu trắng và tính chất cách điện cao.
- **Eo Ranvier:** Bao miêlin không bao bọc liên tục mà ngắt quãng, để lộ ra những đoạn nhỏ trên sợi trục. Những đoạn hở này được gọi là eo Ranvier. Tại đây, màng của sợi trục có mật độ kênh Na^+ và K^+ có cổng điện áp rất cao.

Chính cấu trúc xen kẽ giữa các đoạn có bao miêlin cách điện và các eo Ranvier giàu kênh ion đã tạo nên cơ sở vật chất cho phương thức lan truyền "nhảy cóc".

2. Xung thần kinh và Điện thế hoạt động

a. Xung thần kinh

Xung thần kinh là sự lan truyền của điện thế hoạt động dọc theo sợi thần kinh khi nơron bị kích thích.

- **Công thức/Cấu trúc:** Xung thần kinh = Sự lan truyền của điện thế hoạt động.
- **Giải thích:** Khi một điểm trên sợi trục bị kích thích tới ngưỡng, điện thế hoạt động sẽ xuất hiện tại điểm đó. Sự xuất hiện này lại trở thành tác nhân kích thích điểm kế tiếp, và cứ thế tiếp diễn, tạo thành một "làn sóng" điện lan truyền dọc sợi trục.

b. Điện thế hoạt động

Điện thế hoạt động là sự thay đổi đột ngột và ngắn hạn của điện thế màng, từ trạng thái phân cực (âm bên trong) sang đảo cực (dương bên trong) rồi trở về trạng thái ban đầu.

- **Cấu trúc:** Các giai đoạn của điện thế hoạt động: Giai đoạn khử cực → Giai đoạn tái phân cực → Giai đoạn ưu phân cực.
- **Giải thích:** Quá trình này xảy ra do sự đóng/mở của các kênh ion Na^+ và K^+ có cổng điện áp trên màng tế bào. Khi bị kích thích tới ngưỡng, kênh Na^+ mở ồ ạt, ion Na^+ tràn vào trong gây khử cực và đảo cực. Sau đó, kênh Na^+ đóng

lại, kênh K^+ mở ra, ion K^+ đi ra ngoài gây tái phân cực và ưu phân cực, trước khi bơm Na^+-K^+ lập lại trạng thái cân bằng ban đầu.

3. Cơ chế lan truyền xung thần kinh theo lối "nhảy cóc"

Đây là cơ chế đặc trưng và hiệu quả chỉ có ở sợi thần kinh có bao miêlin.

- **Công thức/Cấu trúc:** Điện thế hoạt động (tại eo Ranvier này) → Dòng điện cục bộ → Kích thích (eo Ranvier tiếp theo) → Hình thành điện thế hoạt động mới.

- **Giải thích chi tiết:** Quá trình diễn ra theo các bước sau:

1. Khi một kích thích đủ ngưỡng tác động vào neuron, điện thế hoạt động xuất hiện tại eo Ranvier đầu tiên (gần thân neuron nhất). Tại đây, ion Na^+ ồ ạt đi vào bên trong sợi trục, làm vùng này tích điện dương so với vùng lân cận.
2. Bao miêlin có tính chất cách điện, ngăn cản sự di chuyển của ion qua màng tại các vùng được bao bọc. Do đó, dòng điện không thể rò rỉ ra ngoài và cũng không thể gây khử cực ở vùng màng có miêlin.
3. Thay vào đó, sự chênh lệch điện thế giữa eo Ranvier đang hoạt động (tích điện dương) và eo Ranvier kế tiếp đang ở trạng thái nghỉ (tích điện âm) tạo ra một dòng điện cục bộ lan truyền nhanh chóng bên trong sợi trục.
4. Dòng điện này di chuyển đến eo Ranvier kế tiếp, kích thích màng tại đây đến ngưỡng, làm mở các kênh Na^+ có cổng điện áp. Một điện thế hoạt động mới được hình thành tại eo Ranvier này.
5. Quá trình cứ thế lặp lại, xung thần kinh không lan truyền liên tục trên toàn bộ sợi trục mà "nhảy" từ eo Ranvier này sang eo Ranvier kế tiếp.

Ví dụ minh họa:

- **Ví dụ 1:** Hãy tưởng tượng bạn đi bộ trên một con đường có những vũng bùn lớn (vùng có bao miêlin) và những phiến đá khô (eo Ranvier) đặt cách nhau. Thay vì lội qua bùn một cách chậm chạp, bạn sẽ nhảy từ phiến đá này sang phiến đá khác. Tương tự, xung thần kinh "nhảy" qua các đoạn miêlin để đến eo Ranvier tiếp theo, giúp tăng tốc độ di chuyển.
- **Ví dụ 2:** Khi bạn vô tình chạm vào vật nóng, cảm giác đau và nóng được truyền từ tay lên não qua các sợi thần kinh cảm giác có bao miêlin. Cơ chế "nhảy cóc" đảm bảo tín hiệu này đến não chỉ trong một phần nghìn giây, cho phép bạn rút tay lại gần như ngay lập tức để tránh tổn thương.

4. Ưu điểm của sự lan truyền "nhảy cóc"

a. Tốc độ lan truyền nhanh

- **Giải thích:** Do xung thần kinh không phải khử cực và tái phân cực tại mọi điểm trên màng mà chỉ diễn ra tại các eo Ranvier, thời gian lan truyền được rút ngắn đáng kể. Dòng điện cục bộ bên trong sợi trục lan truyền gần như tức thời giữa hai eo.
- **Ví dụ:** Tốc độ lan truyền trên sợi có miêlin ở người có thể đạt tới 120 m/s, trong khi trên sợi không có miêlin chỉ khoảng 0.5 - 2 m/s. Tốc độ này rất quan trọng đối với các phản xạ nhanh và các cử động đòi hỏi sự chính xác.

b. Tiết kiệm năng lượng

- **Giải thích:** Năng lượng (ATP) chủ yếu được tế bào thần kinh sử dụng cho hoạt động của bơm $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ để duy trì và khôi phục sự chênh lệch nồng độ ion

sau mỗi điện thế hoạt động. Ở sợi có miêlin, điện thế hoạt động chỉ xảy ra tại các eo Ranvier, chiếm một diện tích rất nhỏ trên toàn bộ sợi trục. Do đó, bơm $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ chỉ cần hoạt động tích cực tại các eo này, giúp tiết kiệm năng lượng hơn rất nhiều so với việc phải hoạt động trên toàn bộ chiều dài sợi trục.

- **Nguyên tắc:** Diện tích màng cần tái lập nồng độ ion nhỏ → Bơm $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ hoạt động ít hơn → Tiêu tốn ít ATP hơn.
- **Ví dụ:** Các neuron vận động điều khiển cơ bắp hoạt động liên tục cần một cơ chế truyền tin hiệu quả về năng lượng để tránh cạn kiệt ATP. Sự lan truyền "nhảy cóc" đáp ứng hoàn hảo yêu cầu này.

5. Bảng so sánh sự lan truyền xung thần kinh trên hai loại sợi thần kinh

Tiêu chí	Sợi thần kinh có bao miêlin	Sợi thần kinh không có bao miêlin
Cấu tạo	Sợi trục được bọc bởi bao miêlin ngắt quãng, tạo ra các eo Ranvier.	Sợi trục không có bao miêlin bao bọc.
Cơ chế lan truyền	Theo lối "nhảy cóc" (Saltatory conduction): Xung thần kinh lan truyền từ eo Ranvier này sang eo Ranvier kế tiếp.	Theo lối liên tục: Điện thế hoạt động lan truyền kế tiếp nhau từ điểm này sang điểm khác dọc theo suốt sợi trục.
Tốc độ	Rất nhanh (có thể lên đến 120 m/s).	Chậm (thường dưới 2 m/s).
Năng lượng tiêu tốn	Ít hơn, do bơm $\text{Na}^+\text{-K}^+$ chỉ hoạt động chủ yếu tại các eo Ranvier.	Nhiều hơn, do bơm $\text{Na}^+\text{-K}^+$ phải hoạt động trên toàn bộ chiều dài sợi trục.
Ví dụ phân bố	Các sợi thần kinh vận động, sợi thần kinh cảm giác (đau, nhiệt, áp suất).	Các sợi thần kinh thực vật (điều khiển hoạt động nội tạng), sợi cảm giác đau âm ỉ.

Kết luận: Sự tiến hóa của bao miêlin là một bước đột phá quan trọng, cho phép động vật có xương sống phát triển hệ thần kinh phức tạp, xử lý thông tin nhanh và phản ứng hiệu quả với môi trường. Cơ chế lan truyền "nhảy cóc" không chỉ giúp tăng tốc độ truyền tin mà còn tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng, là nền tảng cho các hoạt động phức tạp của cơ thể.

VIDOCU.COM